Vol.13, No.2, Summer 2024, pp.339-371 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2022.75260.1176 Open access

Comparison of EPM and RUSLE models in estimating erosion and sediment production using GIS (Case study: Chamgardalan watershed of Ilam province)

Saleh Arekhi[*a], Sharam Barani[b]

[a†]*Associate Professor of Physical Geography, University of Golestan, Gorgan, Iran*
[b]*MS.c Student of Environmntal Hazard, University of Golestan, Gorgan, Iran*

Received: 11 February 2022 ***Revised: 3 May 2022*** ***Accepted: 27 July 2022***

Abstract

Soil erosion is one of the most important environmental problems in the world, which has created many problems for human societies. Qualitative and quantitative assessment of erosion using experimental models for estimating erosion and sediment is one of the solutions through which soil erosion can be controlled to some extent and its amount can be minimized. The present study was conducted to compare EPM and RUSLE models in estimating erosion and sediment in Chamgardalan watershed of Ilam province. In this regard, the factors affecting erosion include rain erosivity, soil erodibility, topography, vegetation and soil conservation operations as well as observable erosion coefficients, rock and soil susceptibility to erosion, land use and average slope, used as a percentage used in the mentioned models and finally the amount of erosion and sediment produced was calculated according to the proposed models and compared with the amount observed in the sedimentation station of Chamgardalan watershed. The results show that the estimated sediment rate of RUSLE model was 16.37 tons per hectare per year and in the EPM method was 21.49 tons per hectare per year, which is closer to the estimated value of RUSLE. Observed sediment of 16.58 tons per hectare per year, the efficiency of RUSLE model in estimating sediment in the study area is higher. Finally, it is recommended to use the EPM model for the initial phases of justification, overview and identification studies and RUSLE method for detailed and more accurate studies of erosion and sedimentation of the watershed.

Keywords: Soil erosion, Sediment estimation, RUSLE model, EPM model, Cham Gardalan watershed, Ilam province

---

[*] .Corresponding author: Saleh Arekhi Email: S.arekhi@gu.ac.ir Tel:+989113690648

How to cite this Article: Arekhi, S., & Barani, S. (2024). Comparison of EPM and RUSLE models in estimating erosion and sediment production using GIS (Case study: Chamgardalan watershed of Ilam province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(2), 339-371.

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۳، ص ۳۷۱-۳۳۹

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2022.75260.1176 دسترسی آزاد

مقایسه مدل‌های RUSLE و EPM در برآورد فرسایش و تولید رسوب با استفاده از GIS (مطالعهٔ موردی: حوضه چم‌گردلان استان ایلام)

صالح آرخی[۱]- دانشیار، گروه جغرافیا و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکدهٔ علوم انسانی دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

شهرام بارانی- دانشجوی کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشکدهٔ علوم انسانی دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

تاریخ دریافت:۱٤۰۰/۱۱/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۱/۲/۱۳ تاریخ پذیرش:۱٤۰۱/۵/۵

چکیده

ارزیابی کیفی و کمی فرسایش با استفاده از مدل‌های تجربی برآورد فرسایش و رسوب، یکی از راهکارهایی است که از طریق آن می‌توان فرسایش خاک را تا حدودی کنترل و مقدار آن را به حداقل رساند. پژوهش حاضر به‌منظور مقایسه دو مدل EPM و RUSLE در برآورد فرسایش و رسوب در حوضه چم‌گردلان استان ایلام انجام شده است. در این راستا، از عوامل مؤثر بر فرسایش شامل فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و عملیات حفاظت خاک و همچنین ضرایب فرسایش مشاهده‌ای، حساسیت سنگ و خاک به فرسایش، استفاده از زمین یا کاربری زمین، شیب متوسط زمین به درصد مورد استفاده در مدل‌های یاد شده استفاده شده و درنهایت مقدار فرسایش و رسوب تولید شده با توجه به مدل‌های ارائه شده محاسبه و با مقدار مشاهده شده در ایستگاه رسوب‌سنجی حوضه چم‌گردلان مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد میزان رسوب برآوردی مدل RUSLE، ۱٦/۳۷ تن در هکتار در سال و در روش EPM، ۲۱/٤۹ تن در هکتار در سال برآورد گردید که با توجه به نزدیک‌تر بودن مقدار برآوردی RUSLE به مقدار رسوب مشاهده‌ای ۱٦/۵۸ تن در هکتار در سال، کارایی مدل RUSLE در برآورد رسوب منطقه موردمطالعه بیش‌تر است. درنهایت توصیه می‌شود، برای فازهای اولیه مطالعات توجیهی، اجمالی و شناسایی از مدل EPM و برای مطالعات تفصیلی و دقیق‌تر برآورد فرسایش و رسوب حوضه از روش RUSLE بهره گرفت.

کلیدواژه‌ها: فرسایش خاک، برآورد رسوب، مدل RUSLE **، مدل** EPM ، حوضه چم‌گردلان، استان ایلام

[۱]. نویسنده مسئول: ۰۹۱۱۳٦۹۰٦٤۸ Email:s.arekhi@gu.ac.ir

مقدمه

خاک یکی از مهم‌ترین عناصر طبیعت و با ارزش‌ترین بستر تولید برای بشر است. مهم‌ترین عاملی که وجود خاک را تهدید می‌کند، فرسایش است. امروزه با پیشرفت دانش و فن و با ماشینی شدن جهان روبرو هستیم که بیش از هر زمان دیگر منابع آب‌وخاک را تهدید می‌کنند، به‌صورتی که هرساله شاهد تولید میلیون‌ها تن رسوب در سراسر دنیا هستیم (Rafahi & Nemeti, 1995)، که فرسایش خاک بر اثر عامل آب بیش از ۵۶ درصد آن را شامل می‌شود (Elirehema, 2001). روش‌های اندازه‌گیری شدت فرسایش در حوضه‌های آبخیز شامل روش‌های تجربی، روش‌های ریاضی و نمونه‌برداری رسوب است (Galal, Hegazy, & Alghailani, Bahrawi, Elhag, Aldhebiani 2016) روش‌های تجربی برآورد فرسایش و رسوب در ایران شامل معادله جهانی تلفات خاک (USLE)[1] (Wischmeier & Smith, 1978)، معادله اصلاحی تلفات خاک (MUSLE)[2] (Ferro, Giordano, & Lovino, 1991)، یا معادله تغییر یافته تلفات خاک (RUSLE)[3] (Renard, Foster, Weesies, McCool, & Yoder, 1997) و EPM[4] (Gavrilovic, 1988) مهم‌ترین این روش‌ها می‌باشند.

در زمینه کاربرد مدل‌های فرسایش در دنیا تحقیقات متعددی صورت گرفته که در ادامه به برخی اشاره می‌گردد.Milevski (2008) و Tazioli (2009) به مناسب بودن روش EPM در برآورد فرسایش اشاره نمودند. Bahrawi et al.(2016) در بررسی خطر فرسایش در عربستان سعودی، تکنیک‌های سنجش‌ازدور و مدل RUSLE را تکنیک مناسبی جهت برآورد رسوب اعلام نمودند. Boggs, Devonport, Evans & Puig (2001)، خطر فرسایش خاک را بر اساس مدل تجدید نظر شده RUSLE و با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاع[5] و نقشه واحدهای زمین برآورد نمودند. Bartsch, Van MiegroetBoettinger, & Dobrwolski (2002)، برای محاسبه فاکتورهای مورد نیاز RUSLE جهت تعیین خطر فرسایش خاک کمپ ویلیامز، از تکنیک‌های GIS استفاده نمودند. بوگیو[6] و همکاران (۲۰۱۷) فرسایش خاک را در زمان بارندگی‌های طبیعی در شیب‌های با طول متفاوت بر روی خاک لخت اندازه‌گیری کرده و نتایج آن را با مقادیر تخمینی USLE و RUSLE مقایسه کردند. نتایج نشان داد مقادیر تخمینی بخصوص در مدل USLE کمتر از هدر رفت خاک اندازه‌گیری شده بود.

در ایران نیز (Amiri, Arzani, Farahpour, Chaeichi, & Khajeh Aldin (2009)، Moradi, Ghonchepour, Nohegar, & Mahmoudi Nejad (2012) در مقایسه مدل EPM و MPSIAC در مناطق خشک ایران اذعان

---

[1]- Unversal soil Loss equation
[2] - Modified Unversal soil Loss equation
[3] - Revised Unversal soil Loss equation
[4] - Erosion Potential Model
[5] - DEM
[6] -Bagio et al

نمودند، مدل MPSIAC دچار پیش‌برآورد و EPM دچار کم‌برآورد در محاسبه نرخ فرسایش و رسوب ویژه می‌گردد و به ترتیب مدل بدبینانه و خوش‌بینانه قلمداد می‌شوند. Ansari Lari, & Ansari, (2017) و Noori, Siadatmousavi, & Mojaradi, (2017) در بررسی مدل EPM، مدل فوق را مدل مناسبی برای برآورد فرسایش معرفی نمودند. Vaezi, Abasi, & Abd Haji Maleki (2017). مدل RUSLE همراه شده با سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی را در عرصه‌های زهکش کوچک در منطقه نیمه‌خشک شمال غربی ایران ارزیابی کردند. بر اساس نتایج، میانگین هدر رفت خاک برآوردی ۴۳/۶۸ تن در هکتار در سال بود که ۶/۵۸ برابر بیشتر از میانگین رسوب سالانه (۸/۶۷ تن در هکتار در سال) در عرصه‌های زهکش بود. (Mokhtari, Shafiei, & Rahmani, 2019) میزان فرسایش خاک را با استفاده از مدل RUSLE در حوضه آبریز نورآباد ممسنی برآورد کردند. نتایج نشان داد میزان خطر فرسایش خاک در سطح حوضه بر حسب تن در هکتار در سال از ۸ تا ۷۵ متغیر است. Azimi Sardari, Bazrafshan, Panagupulus, & Rafiei Sardoei (2019). در مطالعه‌ای حال و آینده مقدار فرسایش خاک را در حوضه آبریز سد استقلال میناب با بهره‌گیری از مدل RUSLE-3D و سناریوهای تغییر اقلیم ارزیابی کردند. نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش در آینده نشان دهنده افزایش آن از ۱۴۶/۷ میلی‌متر به ۱۷۸/۶۱ میلی‌متر در دوره آینده و به‌تبع آن افزایش عامل فرسایندگی باران (R) و درنتیجه افزایش نرخ فرسایش خاک در حوزه سد استقلال میناب است. شرایط سطح خاک مانند پوشش گیاهی، زبری و پوشش قطعات سنگی تأثیر مهمی بر روی نرخ نفوذ، فرسایش و رواناب دارد (Nouwakpo, Williams, Al- Hamdan, Weltz, Pierson, & Nearing, 2016).

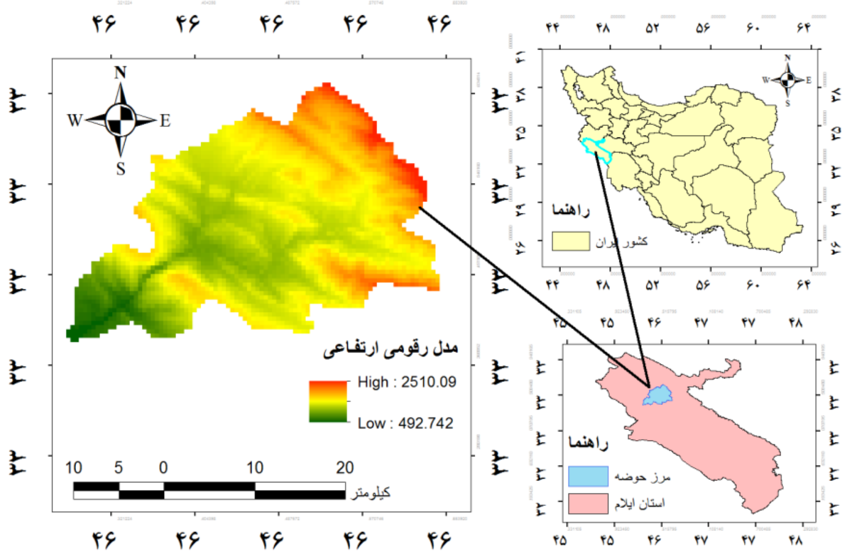
حوضه آبخیز چم‌گردلان ایلام نیز یکی از مناطقی است که متحمل فرسایش فزاینده خاک است و بررسی فرسایش و بار رسوب در آن به‌عنوان یکی از منابع تأمین آب شرب شهر ایلام از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، جلوگیری از این فرسایش، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل جهت حفاظت از منابع طبیعی به شمار می‌رود (Morgan, 1995). در خصوص مطالعات و تحقیقات انجام شده در حوضه چم‌گردلان ایلام می‌توان به رساله کارشناسی ارشد Azami (2001) تحت عنوان تعیین روش مناسب برآورد بار معلق رسوبی در حوضه سد چم‌گردلان ایلام، تخمین فرسایش و رسوب با استفاده از روش‌های کیفی ژئومورفولوژیکی (واحدهای کاری) و EPM و مقایسه آن با آمار خروجی رسوب در حوضه سد چم‌گردلان ایلام Shahbazi (1999)، Asgari, Servati, & Jafari (2008) تحت عنوان برآورد فرسایش و رسوب حوضه سد ایلام با استفاده از مدل MPSIAC اشاره کرد.

در دهه‌های اخیر مخاطرات محیطی اعم از طبیعی و انسانی مانند فرسایش خاک ازجمله مسائلی است که در سطح جهان و ایران با آن روبرو هستند و سالانه هزینه‌های کلانی هم متحمل می‌شوند. ازاین‌رو، ابتدا مخاطرات محیطی از قبیل فرسایش خاک و تولید رسوب باید شناسایی شوند تا مدیران مربوطه با اطلاعات

کامل و دقیقی برای مدیریت و کنترل آن، برنامه‌ریزی مناسبی انجام دهند. ازآنجایی‌که مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب به‌عنوان ابزاری در راستای شناخت اولویت‌های فرسایش و رسوب حوضه‌های آبخیز هستند و مدل‌های EPM و RUSLE بیشترین کاربرد را در مطالعات و تحقیقات آبخیزداری دارد، لذا ارزیابی صحت، دقت و نحوه پراکنش طبقات فرسایش و رسوب حاصل از آن‌ها در سطح حوضه می‌تواند کمک مؤثری در نتیجه‌گیری بهتر از مدل‌ها و به‌کارگیری نتایج آن‌ها در پیشگیری از وقوع مخاطرات زیست-محیطی، اولویت‌بندی مناطق برای اقدامات اجرایی و برنامه‌های حفاظتی داشته باشد که در این زمینه مطالعات زیادی انجام نشده است، لذا هدف از تحقیق فوق، برآورد فرسایش و میزان رسوب در حوضه آبخیز چم-گردلان با استفاده از مدل‌های EPM و RUSLE، مقایسه برآورد این مدل‌ها با آمار رسوب مشاهده‌ای، بررسی راستی آزمایی و اعتبارسنجی دو مدل نسبت به مقدار واقعی و درنهایت معرفی مدل کارآمد در برآورد رسوب در حوضه آبخیز موردمطالعه است.

منطقه موردمطالعه

حوضه آبریز چم‌گردلان در جنوب شرقی شهرستان ایلام در موقعیت بین "۳۰ '۱٦ °٤٦ تا "۳۳ '٤۰ °٤٦ طول شرقی و "۳۲ '۲۳ °۳۳ تا "۵۱ '٤۰ °۳۳ عرض شمالی قرار دارد. مهم‌ترین آبراهه اصلی در این حوضه رود کنجانچم (چم‌گردلان) است که از اتصال دو رود چاویز و گل‌گل با آبراهه متقاطع تشکیل شده است و سد ایلام نیز در محل رودخانه کنجانچم (چم گردلان) احداث شده است (Asgari, Servati, & Jafari, 2008). سد مخزنی ایلام، مهم‌ترین منبع تأمین آب شرب شهر ایلام و روستاهای اطراف می‌باشد و بند انحرافی امیرآباد در خروجی حوضه و همچنین نیاز به منابع آبی فراوان در منطقه به علت وجود شهرستان مهران و اراضی زراعی مرغوب استان در این منطقه در برنامه‌ریزی توسعه اقتصادی و اجتماعی آینده این دو شهرستان نقش بسرایی خواهند داشت. این حوضه برروی سازندهای سست زمین‌شناسی دوران سوم قرار گرفته، از فرسایش‌پذیری بالایی برخوردار است (شکل ۱) (Asgari, Servati, & Jafari, 2008).



شکل۱ موقعیت کشوری و استانی محدوده موردمطالعه

Fig.1. National and provincial situation of the study area

۳- مواد و روش‌ها

در انجام این تحقیق از مواد زیر با توجه به موضوع، ماهیت تحقیق و روش بکار رفته استفاده شده است:

الف- آمار و اطلاعات موجود شامل داده‌های هواشناسی، نقشه‌های خاکشناسی، قابلیت اراضی خاک از منطقه موردمطالعه در ارتباط با موضوع تحقیق مشتمل بر داده‌ها و اطلاعات مربوط به سازمان هواشناسی و سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور جمع‌آوری گردید.

ب- DEM حوضه آبخیز با پیکسل سایز ۳۰×۳۰ به‌عنوان نقشه پایه

ج- نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ جهت تهیه نقشه سنگ‌شناسی و وضعیت سازند منطقه

د- تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI (به تاریخ ۱۳۹۸/۵/۱۵) از سایت Earth explorer جهت تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه موردمطالعه.

ه- بسته‌های نرم‌افزاری،ENVI5.3، ILWIS3.3 و Excel جهت تجزیه‌وتحلیل و استخراج اطلاعات و نقشه‌های پایه.

در این پژوهش از نرم‌افزار ArcGIS10.3 جهت ترسیم نقشه‌ها و تحلیل‌های مرتبط به آن؛ ENVI5.3 جهت استخراج و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و Excel جهت به دست آوردن روابط رگرسیونی معادلات بهره‌گیری شده است.

روش تحقیق

RUSLE

مدل RUSLE، یک مدل آماری بر پایه فرسایش آبی است که با شش فاکتور فرسایشی زیر رابطه دارد (Wischmeier & Smith, 1978):

$$A=R.K.L.S.C.P \qquad (۱)$$

در این رابطه، A میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار در سال)، R فاکتور فرسایندگی باران (مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال)، K فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر) فاکتور طول شیب، S فاکتور درجه شیب، C فاکتور عملیات مدیریتی و پوشش و نهایتاً P فاکتور عملیات حفاظتی می‌باشد. مقادیر L، C،S و P بدون واحد می‌باشند. در این پژوهش، روش بررسی کلی شامل استفاده از مدل RUSLE در محیط GIS می‌باشد. پاراگراف‌های بعدی نیز درباره نحوه برآورد فاکتورهای P،C،K،R و LS که به ترتیب از داده‌های بارش، نقشه‌های خاک، پردازش تصاویر ماهواره‌ای (فاکتورهای C و P) و مدل رقومی ارتفاعی به دست می‌آیند، توضیح می‌دهد.

فاکتور فرسایندگی باران (R)

فرسایندگی باران به‌صورت قدرت تراکمی باران در بروز فرسایش تعریف می‌شود (Lal, 1990). معمول‌ترین شاخص فرسایندگی باران، فاکتور R مربوط به مدل‌های USLE (Yu & Rosewell, 1996) و RUSLE (Renard & Freimund, 1994) می‌باشد. بررسی مقالات علمی نشان می‌دهد، در بسیاری از نقاط دنیا، فاکتور Rهمبستگی بالایی با فرسایش خاک دارد. فاکتور R برای دوره‌های مختلف، از حاصل‌ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (I30) به دست می‌آید. ازآنجایی‌که نمودار بارندگی و داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به‌ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشند، غالباً از مقادیر متوسط بارندگی سالیانه و ماهیانه، جهت برآورد فاکتور R در مدل‌های USLE و RUSLE استفاده می‌شود. برای محاسبه فاکتور R، بعد از تعیین ایستگاه‌های شاخص در منطقه موردمطالعه، بارندگی ماهیانه و سالیانه در این ایستگاه‌ها و در دوره زمانی موردمطالعه بازسازی گردید (بر اساس اطلاعات ایستگاه ایلام که کامل‌ترین و بیشترین آمار را داشته است). در مرحله بعد با استفاده از معادله ذیل، شاخص فورنیر و فاکتور R برای تمام ایستگاه‌ها به دست آمد. رابطه شاخص فورنیر،F، به‌صورت ذیل است:

$$F=\frac{\sum_{i=1}^{12}Pi^2}{\sum_{i=1}^{12}P} \qquad (۲)$$

در این معادله، pi متوسط بارندگی (میلی‌متر) در ماه i و p متوسط بارندگی سالیانه (میلی‌متر) است. در این مطالعه، با استفاده از معادله (۲)، شاخص فورینر برای تمامی ایستگاه‌ها، محاسبه گردید و سپس با جایگذاری

شاخص فورنیر (رابطه ۲) در روابط زیر که توسط Renard & Freimund (1994) برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده، مقدار فاکتور R برای ایستگاه‌های شاخص برآورد شد.

$$R - factor = (0.07397 \times F^{1.847}/17.2 \quad (۳) \qquad \text{اگر } F<55\ mm$$

$$R - factor = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times F^2/17.2 \quad (٤) \qquad \text{اگر } F>=55\ mm$$

فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K)

فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K)، سرعت فرسایش‌پذیری خاک به ازای واحد شاخص فرسایش باران است که در پلات استاندارد اندازه‌گیری می‌شود و اغلب با استفاده از خصوصیات خاک تعیین می‌شود. اگرچه فاکتور K با بافت خاک، میزان ماده آلی خاک، نفوذپذیری و سایر فاکتورها رابطه دارد، اما عمدتاً با نوع تیپ خاک همبستگی بالایی دارد. فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در مدل RUSLE از طریق نوموگراف تعیین می‌شود. این نوموگراف متشکل از پنج پارامتر پروفیل خاک می‌باشد. رابطه جبری این نوموگراف به‌صورت ذیل است:

$$K = 2.73 \times 10^{-6} m^{1.14}(12 - a) + 3.25 \times 10^{-2}(b - 2) + 2.5 \times 10^{-2}(c - 3)$$

در این معادله، M قطر ذره (درصدسیلت + درصد شن خیلی ریز)×(درصد رس– ۱۰۰)، a درصد ماده آلی، b کد ساختمان خاک و c کلاسه نفوذپذیری پروفیل خاک می‌باشند. در این مطالعه، تمام پارامترهای اشاره شده در بالا از گزارش تفصیلی حوضه آبخیز چم‌گردلان ایلام استخراج و نقشه فاکتور K در محیط GIS تهیه شد.

فاکتورهای طول شیب (L) و درجه شیب (S)

فاکتورهای L و S در مدل RUSLE، تأثیر توپوگرافی را بر روی فرسایش خاک نشان می‌دهد. ثابت شده که افزایش در طول شیب و درجه شیب می‌تواند سرعت جریان آب را در سطح زمین افزایش دهد و باعث تشدید فرسایش خاک شود (Haan, Barfield, & Hayes, 1994) و از اینها گذشته فرسایش خالص خاک نسبت به تغییرات در درجه شیب در مقابل طول شیب حساس‌تر است (McCool, Brown, & Foster, 1987). طول شیب فاصله بین نقطه بالایی آغاز سراشیبی تا نقطه‌ای است که شیب به حداقل خود می‌رسد و در این نقطه رسوبات ته‌نشین می‌شوند. تأثیرات ویژه توپوگرافی روی فرسایش خاک توسط فاکتور LS (بدون واحد)(طول شیب (L) و درجه شیب (S) برآورد می‌شود. برای محاسبه فاکتورهای L و S از فرمول‌های زیر استفاده می‌شود(Moore & Wilson, 1993):

$$S = [\frac{\sin\beta}{0.0896}]^{1.3} \quad (۷) \qquad L = 1.4[\frac{A_s}{22.13}]^{0.4} \quad (٦)$$

در این معادله As مساحت دامنه بالادست در واحد عرض خطوط توپوگرافی (m^2/m) و β زاویه شیب برحسب درجه است. در این مطالعه، نقشه فاکتور LS از نقشه DEM با قدرت تفکیک ۳۰ متر از وب سایت

سازمان نقشه‌برداری امریکا به آدرس http://earthexplorer.usgs.gov دانلود و با استفاده از اکستنشن TOPOCROP آرک‌جی‌آی اس ۱۰.۳ استخراج شد که براساس کار Moore & Wilson(1993) توسعه یافته است.

فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C)

فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های کاشتی در مدیریت کشاورزی و اثر پوشش‌های درختی، درختچه‌ای، علفی و زمینی روی کاهش فرسایش خاک می‌باشد. با افزایش پوشش گیاهی، فرسایش خاک کاهش می‌یابد. Benkobi, Trlica, & Smith (1994) و Biesemans, Meirvenne, & Gabriels (2000) گزارش کردند، فاکتور پوشش گیاهی به همراه درجه شیب و طول شیب در فرسایش خاک و تولید رسوب حساسیت بیشتری دارند. در مدل RUSLE، فاکتور پوشش گیاهی (C)، معمولاً بر اساس معادلات تجربی تعیین می‌گردد. اما پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور به دست می‌آید. برای تصویر لندست این شاخص به‌صورت ذیل به دست می‌آید:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR-IR}}{\mathrm{NIR+IR}} \qquad (۸)$$

این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر NDVI بین ۱- و ۱+ در نوسان است. زمانی که پاسخ طیفی اندازه‌گیری‌شده از سطح زمین برای هر دو باند خیلی مشابه باشد، مقادیر NDVI به صفر نزدیک می‌شود. پوشش گیاهی سالم (دارای فعالیت فتوسنتزی) در بخش طیفی مادون‌قرمز نزدیک (NIR) (باند ۵ لندست) در مقایسه با بخش طیف مرئی (قرمز، باند ٤ لندست) انعکاس بیشتری دارد. بنابراین مقادیر NDVI برای پوشش گیاهی سبز مثبت خواهد شد. مناطق با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی از قبیل مناطق شهری و اراضی بایر معمولاً مقادیر NDVI بین ۰/۱+ و ۰/۱- را نشان می‌دهند. ابرها و منابع آبی مقادیر منفی یا صفر را نشان می‌دهند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) برای محاسبه داده‌های طیفی زمینی استفاده شده و نتایج آن نشان داده که این شاخص، همبستگی بالایی با زیست‌توده سطح زمین دارد. بعد از انجام تبدیل خطی معکوس از نمونه‌های تعلیمی، رابطه بین C و NDVI می‌تواند به‌صورت زیر ایجاد گردد(Lin, 1997):

$$C = (1 - \mathrm{NDVI})/2 \qquad (۹)$$

درنتیجه مقدار C در هر سلول می‌تواند موردمحاسبه قرار گیرد.

فاکتور عملیات حفاظتی (P)

در این مطالعه، مقادیر فاکتور P از طریق طبقه‌بندی مجدد هر تیپ پوشش زمین و بر اساس مقادیر داده شده در جدول‌های ۱ و ۲ تعیین شدند (Deore, 2006). با توجه به اینکه در حوضه تحت بررسی هیچ‌گونه عملیات اصلاحی و مدیریتی صورت نگرفته، ارزش P تنها براساس کاربری و پوشش اراضی مختلف تعیین شده است (جدول ۱ و ۲).

جدول ۱- ارزش P برای کاربری و پوشش اراضی مختلف (Deore, 2006)

Table 1- P value for different land use and coverage

کلاس کاربری/پوشش اراضی	ارزش عددی P
اراضی بایر	۱
نیشکر	۰/۱۲
گندم	۰/۱
جنگل تنک	۰/۸
اراضی آیش	۱
جنگل با تراکم متوسط	۰/۸
جنگل باز	۰/۸
بستر رودخانه	۱

جدول ۲- ارزش P برای عملیات حفاظتی مختلف (Deore, 2006)

Table 2- P value for different protective measurement

شیب (درصد)	ارزش عددی P			
	کشت روی خطوط تراز	کشت نواری	تراس‌بندی	بدون اقدامات حفاظتی
۰-۱	۰/۸	-	-	۱
۱-۲	۰/۶	۰/۳	-	۱
۲-۷	۰/۵	۰/۲۵	۰/۱	۱
۷-۱۲	۰/۶	۰/۳	۰/۱۲	۱
۱۲-۱۸	۰/۸	۰/۴	۰/۱۶	۱
۱۸-۲۴	۰/۹	۰/۴۵	۰/۱۶	۱

محاسبه نسبت تحویل رسوب (SDR)

در این مطالعه، سه روش بر اساس مساحت (USDA,1975؛ Boyce, 1975؛ Vanoni, 1975) به‌منظور محاسبه نقشه نسبت تحویل رسوب مورد استفاده قرار گرفتند. معادلات مربوط به این سه روش به شرح زیر می‌باشد:

۱- مدل وانونی (ارائه شده در سال ۱۹۷۵) به شرح رابطه ۱۰

$$SDR = 0.4724A^{-0.125} \quad (۱۰)$$

که A = مساحت حوضه (کیلومترمربع)

۲- مدل ارائه شده توسط USDA در سال ۱۹۷۲ به شرح رابط ۱۱

$$SDR = 0.5656A^{-0.11} \quad (۱۱)$$

که A = مساحت حوضه (کیلومترمربع)

۳- مدل بویس (۱۹۷۵) که به شرح رابطه ۱۲ است

$$SDR = 0.3750A^{-0.2382} \quad (۱۲)$$

که A = مساحت حوضه (کیلومترمربع)

مدل EPM

در روش EPM چهار مشخصه شامل ضریب فرسایش حوضه آبخیز (ψ)، ضریب استفاده از زمین (Xa)، ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) و شیب متوسط حوضه (I) در واحدهای همگن موردبررسی قرار گرفت. در هر یک از واحدهای همگن بر اساس این چهار عامل، مقدار (Z) یا ضریب شدت فرسایش از رابطه ۱۳ محاسبه گردید (Gavrilovic, 1988).

$$Z = Y.Xa(\psi + I^{0.5} \quad (۱۳)$$

که در آن

Y : عامل حساسیت خاک و سنگ به فرسایش

Xa : عامل استفاده از زمین

Ψ : عامل فرسایش

I : عامل شیب زمین به درصد

با محاسبه ضریب شدت فرسایش و قرار دادن مقدار آن در جدول استاندارد (جدول ۳) (Gavrilovic, 1988) که بر اساس شدت فرسایش و ضریب شدت فرسایش (Z) تنظیم شده است، طبقه فرسایشی هر یک از واحدهای همگن مشخص می‌شود.

جدول ۳- طبقه‌بندی شدت فرسایش

Table 3- Erosion intensity classification

کلاس فرسایش	شدت فرسایش	محدوده Z	مقدار متوسط Z
V	خیلی شدید	>۱	۱/۲۵
IV	شدید	۱ > Z >۰/۷۵	۰/۸۵
III	متوسط	۰/۷ > Z >۰/۴۱	۰/۵۵
II	کم	۰/۴ > Z >۰/۲	۰/۳
I	خیلی کم	Z < ۰/۱۹	۰/۱

در روش EPM برای تخمین متوسط سالانه فرسایش ویژه که در حقیقت میزان فرسایش را در واحد سطح (هکتار یا کیلومترمربع) حوضه را نشان می‌دهد، از رابطه ۱۴ استفاده می‌شود.

$$W_{SP} = \mathrm{T.H.\pi.Z^{1.5}} \qquad (۱۴)$$

که در آن:

H: بارندگی متوسط سالانه به میلی‌متر، Π: عدد ثابت پی برابر با ۳/۱۴

T: ضریب درجه حرارت که از رابطه ۱۵ به‌دست می‌آید (Gavrilovic, 1988):

$$\mathrm{T} = (\frac{\mathrm{t}}{10} + 0.1)^{0.5} \qquad (۱۵)$$

که در آن:

t= میانگین درجه حرارت سالانه در حوضه به درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بعد از محاسبه فرسایش ویژه، مقدار فرسایش سالانه برای حوضه موردمطالعه با استفاده از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{W_s = W_{sp} \times A} \qquad (۱۶)$$

که در آن

$\mathrm{w_s}$: فرسایش کل حوضه بر حسب مترمکعب در سال،

A: مساحت حوضه بر حسب کیلومترمربع

$\mathrm{w_{sp}}$: محاسبه شده در رابطه فوق بیانگر مقدار خاکی است که از بستر خود جدا کرده و انتقال یافته است؛ اما همه این مواد فرسایش یافته به خروجی حوضه نمی‌رسد و آن مقدار خاک فرسایش یافته که به رسوب خروجی تبدیل خواهد شد، بستگی به متغیرهای مختلفی دارد که در واقع بر نسبت رسوب‌دهی حوضه تأثیر می‌گذارند. در این مدل از ضریبی برای تبدیل میزان فرسایش به رسوب استفاده می‌شود که ضریب رسوب-دهی حوضه نامیده می‌شود.

محاسبه ضریب رسوبدهی حوضه

با اعمال این ضریب معین می‌شود که چه میزان مواد رسوبی از نقطه خروجی حوضه خارج خواهد شد. ضریب رسوب‌دهی در روش EPM براساس رابطه ۱۷ (Gavrilovic, 1988) و با استفاده از عواملی مثل محیط و ارتفاع و طول حوضه به دست می‌آید:

$$\mathrm{Ru} = 4 \times (\mathrm{O} \times \mathrm{D})^{0.5}/[\mathrm{L}+10] \qquad (۱۷)$$

که در این رابطه:

Ru: ضریب رسوب‌دهی حوضه، O: محیط حوضه، به کیلومتر، L: طول حوضه آبخیز، کیلومتر، D: اختلاف ارتفاع بین ارتفاع متوسط و ارتفاع نقطه خروجی حوضه، به کیلومتر که از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$D = D_{av} - D_O \quad (۱۸)$$

که در این رابطه:

D_{av}: ارتفاع متوسط حوضه آبخیز بر حسب کیلومتر

D_O: ارتفاع نقطه خروجی در رودخانه بر حسب کیلومتر است؛ بنابراین مقدار D را پس از محاسبه، در رابطه ۵ قرار داده و ضریب رسوب‌دهی حوضه محاسبه می‌شود. سپس رسوب ویژه از رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود (Gavrilovic, 1988).

$$Gsp = Wsp \times Ru \quad (۱۹)$$

که در این

Gsp : تولید رسوب ویژه، بر حسب مترمکعب در کیلومترمربع در سال

Wsp : فرسایش ویژه، بر حسب مترمکعب در کیلومترمربع در سال

Ru : ضریب رسوب‌دهی حوضه که از رابطه ۱۷ به دست می‌آید (Gavrilovic, 1988)

و درنهایت رسوب کل حوضه از رابطه ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$G_s = G_{sp} \times A \quad (۲۰)$$

که در این رابطه:

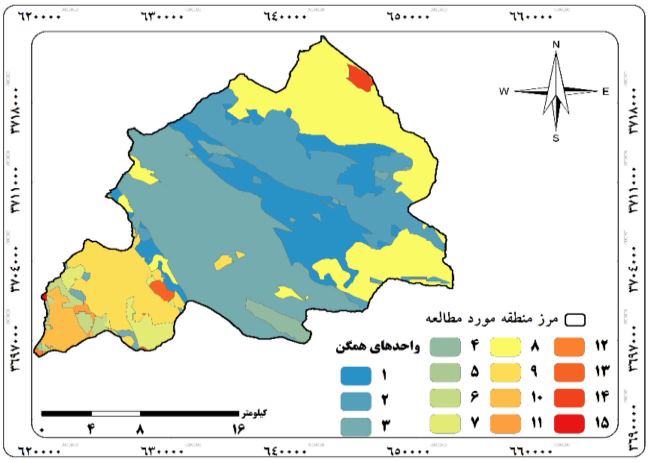
G_s : رسوب کل بر حسب مترمکعب در سال در حوضه،

A: مساحت حوضه آبخیز بر حسب کیلومترمربع می‌باشد.

در این تحقیق برای برآورد شدت فرسایش و پتانسیل رسوبدهی حوضه آبخیز موردمطالعه از روش EPM و تکنیک GIS استفاده شده است. بعد از وارد کردن نقشه‌ها به محیط نرم‌افزار ArcGIS و زمین مرجع کردن آن‌ها، لایه‌های مورد نیاز رقومی و پایگاه اطلاعاتی برای آن‌ها ایجاد شد. سپس با استفاده از مدل EPM، عوامل مؤثر در فرسایش در واحدهای همگن (شکل ۲) ارزیابی و امتیازبندی شد. در این روش که در حقیقت ضریب شدت فرسایش است، چهار عامل ضریب فرسایش حوضه (ψ)، ضریب استفاده از زمین یا کاربری اراضی (Xa)، ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) و شیب متوسط حوضه آبخیز (I) در واحدهای همگن و درنهایت در کل حوضه موردمطالعه قرار گرفت. در هریک از واحدهای همگن، بر اساس چهار عامل فوق، مقدار Z یا ضریب شدت فرسایش، متوسط سالانه فرسایش ویژه، فرسایش کل، رسوب ویژه و رسوب کل تولید شده در طول سال در سطح واحدهای همگن و بالاخره در کل حوضه آبخیز محاسبه گردیده است.

همان‌طور که ذکر شد، برای سهولت و دقت کار در به دست آوردن میزان فرسایش و تولید رسوب، ابتدا کل حوضه آبخیز چم‌گردلان، به واحدهای همگن تقسیم شد (۱۵ واحد همگن). سپس عوامل مؤثر در تولید

رسوب در هر یک از واحدهای همگن موردمطالعه قرار گرفت. در مرحله آخر، میزان فرسایش و تولید رسوب با استفاده از فرمول‌ها و ضرایب مربوطه به دست آمد که در زیر به بررسی هر یک از عوامل چهارگانه خواهیم پرداخت.



شکل ۲- واحدهای همگن

Fig.2. Homogeneous units

ارزیابی کارایی مدل‌ها

ارزیابی دقت مدل برای اطمینان از صحت برآوردها ضروری است. ارزیابی مدل‌ها با استفاده از داده‌های برآوردی رسوب و داده‌های حاصل از اندازه‌گیری رسوب در خروجی حوضه انجام گرفت. همچنین کارایی مدل که اغلب برای کالیبراسیون، صحت سنجی و برآورد دقت مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد از رابطه زیر تعیین شد (رابطه ۲۱). پس از برآورد رسوبات توسط مدل مذکور، برای ارزیابی کارایی مدل بکار رفته از رابطه زیر استفاده گردید.

$$R_E = (|S_O - S_E|/S_o) \times 100 \quad (۲۱)$$

R_E=درصد خطای نسبی مدل،

S_O= مقدار رسوب مشاهده‌ای،

S_E= مقدار رسوب برآوردی

مقدار R_E بیانگر میانگین انحراف است که می‌تواند مثبت یا منفی باشد. به‌بیان‌دیگر مشخص می‌کند که مدل، متغیر موردنظر را کم یا زیاد برآورد می‌کند. از نظر تئوری هرگاه این دو مقدار برابر با صفر شوند، نمایانگر این مطلب است که دقت روش صد در صد بوده و مقدار برآورد شده یک کمیت، دقیقاً برابر با مقدار واقعی آن است.

نتایج و بحث

مدل RUSLE

شاخص‌های فورنیر و مقادیر فرسایندگی باران با استفاده از معادلات (۲)، (۳) و (٤) برای ۱۸ ایستگاه در طی دوره آماری ۲۲ ساله (۱۳۷٦–۱۳۹۸) محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده شاخص فورنیر و فاکتور R در جدول ٤، نشان داده شده است. ابتدا بر اساس رابطه بین ارتفاع و بارش و سپس بر اساس رابطه بارش و فاکتور R، نقشه فاکتور R حوضه چم‌گردلان در محیط نرم‌افزار ILWIS3.3 به دست آمده است (شکل ۳). مقدار متوسط فاکتور R از ۱۳٦ تا ۳۹٦ (مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال) متغیر بوده و مقدار متوسط و انحراف معیار آن به ترتیب ۲٦٤ و ٤٤ (مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال) می‌باشد. فرسایندگی باران در شمال‌شرقی و جنوب‌غربی حوضه موردمطالعه که ارتفاع بالاتری داشتند بیش‌تر بوده که با رنگ قرمز نشان داده شده است یا به‌عبارت‌دیگر، کاهش ارتفاع و باران رابطه مستقیمی با کاهش فاکتور R دارد و از شمال–غرب و جنوب‌غرب به مرکز حوضه داشته است.

فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K)

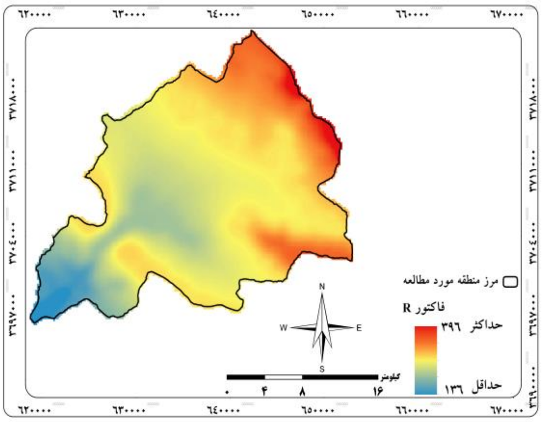
جهت محاسبه فاکتور K اطلاعات مورد نیاز از نقشه‌های تفصیلی حوضه چم‌گردلان و لایه‌های زمین‌شناسی، خاک‌شناسی استفاده شده که متوسط مقدار K در حوزه موردمطالعه بین ۰/۲۸ تا ۰/٦٦ متغیر بوده میانگین و انحراف معیار آن به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۰۵ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر می‌باشد. شکل ٤ توزیع مکانی فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد.

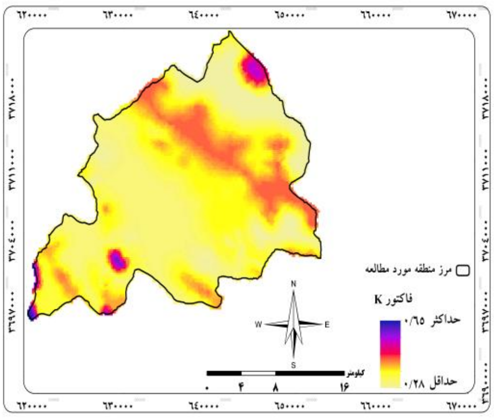
جدول ٤- محاسبه و برآورد F و R برای ایستگاه‌های بارندگی

Table 4- Calculation and estimation of F and R for rainfall stations

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)	ارتفاع (متر)	بارندگی (میلی‌متر)	F	R مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال
ارکواز	٦٤٨٤٧٨	۳٦۹٥۸۱۹	۱۲۹۰	٦٤۳/٥۰	۱۱٦/٥٤	۳٤۱/۰۲
صالح‌آباد	٦۱۰٤۰۸	۳۷۰٤۱۲۹	٦۲۰	۳٦۳/۷۰	۸۷/٦۳	۱۸۷/٥٥
سراب کلان	٦٥۹۳۷۹	۳۷۱٦۲۷۰	۹۷۰	٤۸۱	۸۷/۱۷	۱۸٥/٤٦
شهید طالقانی	٦٥۱۹۰۰	۳٦۹۲٥۸۰	۱٤۰۰	٤۷۷/۹۰	۸۱/۳۱	۱٦۰/۱۸
طولاب	٦٤۷۰٤۹	۳۷۱۳۸۸٦	۱٦۰۰	٥۲۲/٥۰	۹٦/۸٦	۲۳۱/٥۱
قلندرعلیا	٦٥۱۰۱۰	۳۷۲۳۹٦٦	۱۰٤٥	٤۹۹/٥۰	۸۷/٤۸	۱۸٦/۸۸
میشخاص	٦٤۲۸۰٤	۳۷۰۸٦۳٦	۱۲٥۰	٥۹۰/۲۰	۱۱۲	۳۱۳/۸۳

کارزان	٦٤١٨٦٠	٣٧٣٣٦١٧	١٢٨٠	٤٩٤	٨٥/٨٦	١٧٩/٦٣
گناباد	٦٤٣٣٠٧	٣٦٨٠٤٥٩	٨٦٠	٤٧٤	٨٦/٧٤	١٨٣/٥٥
درگه	٦٤٧٣٤٤	٣٦٨٦٩٦٩	١٣٠٠	٧٤٧/٤٠	١٢٠/٢٨	٣٦٤/٢٨
قجر	٦٣٨٧٦٨	٣٧١٥٥٥٤	١٤٨٠	٤٧٧/٧٠	٨٩/٥٤	١٩٦/٢٥
بان رحمان	٦٢٦٣٥٥	٣٦٦٩٩٨١	٢٩٠	٢٨٨/٧٠	٥٨/١٨	٧٨/٨٦
سیاه آب	٦٣٩٠٩٠	٣٦٨٩٩٨٤	١٢٢٠	٤٨٦	٩٣/٧٢	٢١٦/٠٤
گل گل	٦٣٧٧٣٦	٣٧٠٣٨٢٦	١١٤٠	٥٩٧	١١٠/٩٠	٣٠٧/٤٤
گلان	٦١٧٤٧١	٣٦٩٨٥١٤	٥٦٠	٣٤٤/٧٠	٧٧/١١	١٤٣/٢٠
ایلام	٦٣٣٠١٣	٣٧١٦٨٧٩	١٣٣٧	٥٩٧/٧٠	١١١/٤٤	٣١٠/٥٥
مهران	٦٠٨٧١٣	٣٦٦٥١٠٦	٢٠٠	٢٣١	٦٤/٣٠	٩٧/٤٨
اما	٦٣٣٢١٤	٣٧٠٢٠٩٤	١٠٩٠	٥١١/٥٠	٩٦/٧٢	٢٣٠/٨٣





شکل ۳- نقشه عامل فاکتور R

Fig.3. R factor map

شکل ٤- نقشه فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K)

Fig.4.Map of Soil erodibility factor (K)

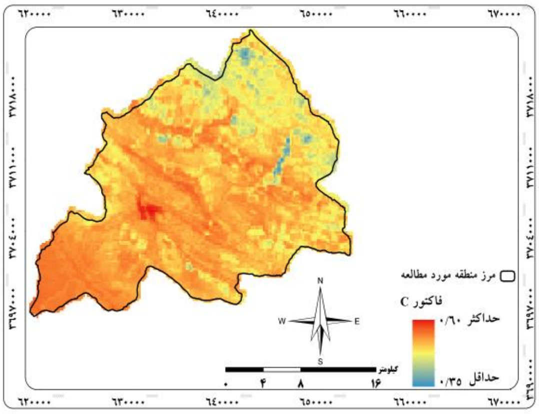
فاکتورهای طول شیب (L) و درجه شیب (S)

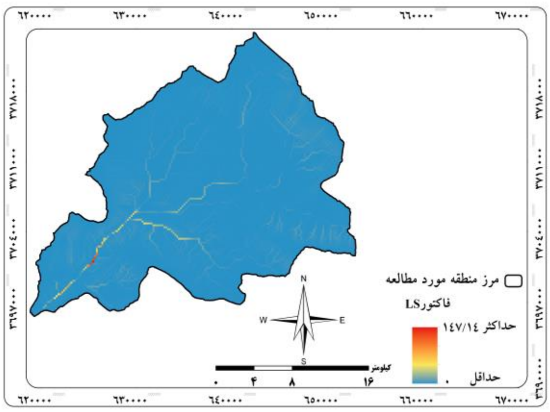
نقشه توپوگرافی منطقه موردمطالعه به‌منظور ایجاد طول شیب و درجه شیب (LS) مورد استفاده قرار گرفته است. فاکتور LS به‌وسیله معادله‌های مربوطه با استفاده از نقشه DEM حوضه و با در نظر گرفتن کنش متقابل بین توپوگرافی و تجمع جریان آب محاسبه شد. همان‌طور که از شکل ٦ برمی‌آید، فاکتور LS در

منطقه موردمطالعه بین ۰ تا ۱٤۷ در سطح پیکسل متغیر بوده و مقدار متوسط آن ۲ می‌باشد. مقادیر LS در بعضی از مناطق با شیب‌های تند مانند رودخانه‌ها و یال‌ها بیش‌تر است.

فاکتور مدیریت پوشش (C)

نقشه فاکتور C براساس NDVI تهیه گردید (شکل ٦). در حقیقت این فاکتور به‌طور کامل، رابطه معکوس با NDVI دارد. مقدار فاکتور C بین ۰/۳۵ تا ۰/ ٦۰ متغیر است و متوسط آن ۰/۵۱ می‌باشد. نقشه فاکتورC نشان می‌دهد این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی حداکثر است و کمترین مقدار آن در مناطقی است که پوشش متراکم وجود دارد که با رنگ روشن‌تر نشان داده شده است.





شکل ۵ نقشه فاکتور طول شیب و درجه شیب (LS)

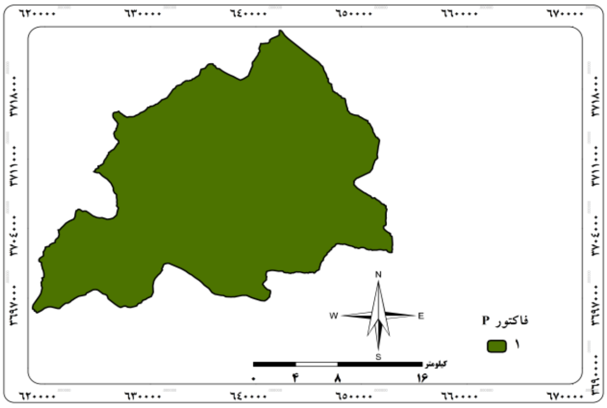
Fig.5. Map of Slope length factor and slope degree (LS)

شکل ٦ نقشه مدیریت پوشش، فاکتور (C)

Fig.6. Coverage Management Map, Invoice (C)

- فاکتور عملیات حفاظتی (P)

با توجه به اینکه در حوضه تحت بررسی هیچ‌گونه عملیات اصلاحی و مدیریتی صورت نگرفته، فاکتور عملیات حفاظتی (P)، یک در نظر گرفته می‌شود (شکل ۷). آمار مربوط به فاکتورهای R، K،LS، C و P در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۷- نقشه عملیات حفاظتی فاکتور (P)

Fig.7. Map of factor protection operations (P)

جدول ۵- آمار مربوط به فاکتورهای معادله RUSLE در حوضه چم‌گردلان ایلام

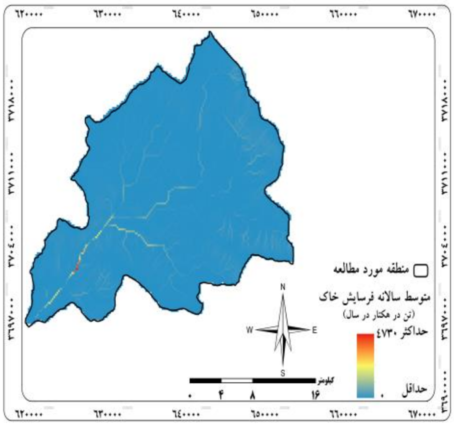
Table 5- Statistics related to the factors of the RUSLE equation in the Cham-Gardlan basin of Ilam

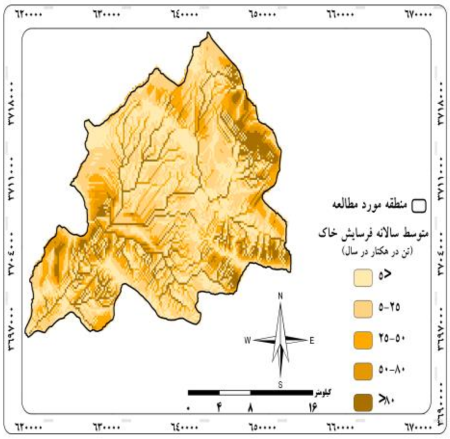
	فاکتور R	فاکتور K	فاکتور LS	فاکتور C	فاکتور P
حداقل	۱۳٦	۰/۲۸	۰	۰/۳۵	۱
حداکثر	۳۹٦	۰/٦٦	۱٤۷	/٦۰	۱
میانگین	۲٦٤	۰/۳۵	۲	۰/۵۱	۱
انحراف معیار	٤٤	۰/۰۵	۹	۰/۰۳	۰

فرسایش سالانه خاک

متوسط فرسایش سالیانه خاک به‌وسیله ضرب کردن فاکتورهای فرسایندگی (R)، فاکتور فرسایش‌پذیری (k)، فاکتور توپوگرافی (LS)، فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) و فاکتور عملیات حفاظتی (P) در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.3 محاسبه شد. نقشه به دست آمده از این مدل، در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر فرسایش خاک در منطقه موردمطالعه بین صفر و ٤۷۳۰ تن در هکتار در سال تعیین شد. در مرحله بعد نقشه فرسایش سالانه خاک به ۵ کلاس خطر طبقه‌بندی شده است (شکل ۹). مقادیر فرسایش خاک در منطقه موردمطالعه بین صفر(بدون فرسایش) تا ٤۷۳۰ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر می‌باشد. متوسط و انحراف معیار آن نیز به ترتیب برابر با ۸٦/۵۰ و ۳٤٦/۰۰ تن در هکتار در سال تعیین شد. نقشه به دست آمده از این مدل، در شکل ۸ نشان داده شده است. در مرحله بعد نقشه فرسایش سالانه خاک به ۵ کلاس خطر طبقه‌بندی شده است (شکل ۹) (Yue-Qing, Shao, & Kong, 2008). فراوانی هر یک از کلاس‌های

خطر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیشترین قسمت حوضه موردمطالعه، جزء طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم (٦٥ درصد) قرار داشت که عمدتاً این کلاس‌ها در بخش میانی حوضه واقع شده بودند. حدود ۲۰ درصد حوضه نیز تحت خطر زیاد تا خیلی زیاد قرار داشت که ازاین‌بین، بیشترین مناطق تحت خطر فرسایش بالا تا شدید، در مناطق شمال غربی، غرب و شمال شرقی و جنوب شرقی حوضه قرار داشتند. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد، فاکتور LS با ضریب همبستگی ۰/۸۱ بیشترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است (شکل ۱۱). این در حالی است که همبستگی بسیار پایینی بین سایر فاکتورها و فرسایش سالیانه خاک وجود داشت (جدول ٦).



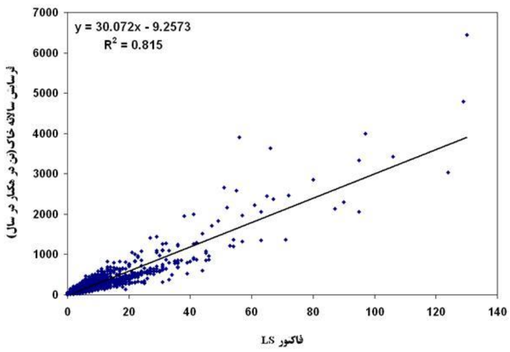


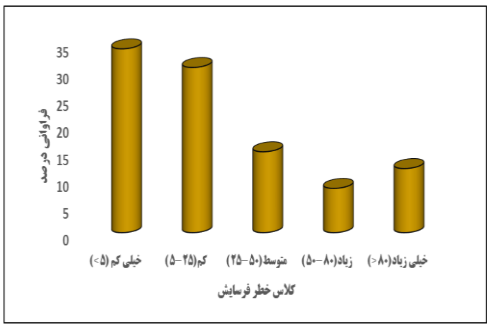
شکل ۸- نقشه متوسط سالانه فرسایش

Fig.8. Annual average erosion map

شکل ۹- نقشه کلاس فرسایش خاک

Fig.9. Soil erosion class map





شکل ۱۱- رابطه فاکتور LS با متوسط سالانه فرسایش خاک شکل ۱۰- فراوانی کلاس‌های خطر فرسایش

Fig.10. Frequency of erosion risk classes

Fig.11. Relationship between LS factor and average annual soil erosion

جدول ٦- میزان همبستگی و روابط رگرسیونی بین مقدار فرسایش سالانه خاک و پارامترهای مدل RUSLE

Table 6-

فاکتورهای RUSLE	تلفات سالانه خاک
R	$r^2 = 0.0024$, $y = -0.3526x + 195.16$
K	$r^2 = 0.0151$, $y = 270.91x + 198.17$
LS	$r^2 = 0.8111$, $y = 20.337x + 45.145$
C	$r^2 = 0.0866$, $y = 503.16x - 67.268$
P	$r^2 = 0.0993$, $y = 1642.6x - 1071.3$

بار رسوب

در این مطالعه، متوسط مقادیر نسبت تحویل رسوب بین ۰/۱۲ تا ۰/۳٤ و متوسط بار رسوب در خروجی حوضه بین ۵/۳٦ تا ١٦/۳۷ تن در هکتار در سال متغیر بود (جدول ۷).

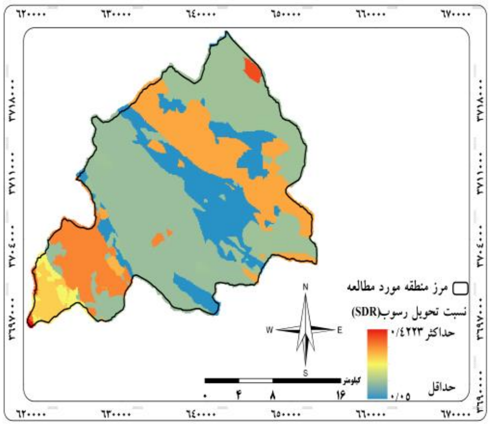
میزان رسوب مشاهده و محاسبه شده بر اساس ١٦ سال آمار ایستگاه هیدرومتری با استفاده از منحنی‌های سنجه (حد وسط دسته‌ها) به‌طور متوسط معادل ١٦/۵۸ تن در هکتار در سال (Azami, 2001) بوده و مقدار رسوب برآورد شده (متوسط رسوب برآورد شده) بر اساس مدل RUSLE با استفاده از روش نسبت تحویل رسوب USDA معادل ١٦/۳۷ تن در هکتار در سال می‌باشد. در ضمن مقدار بار رسوبی برآورد شده در این حوضه توسط Shahbazi (1999) با استفاده از روش EPM برابر ١٨/٩٠ تن در هکتار در سال (آمار مشاهده-ای معادل ١٦ تن در هکتار در سال) وAsgari, Servati, & Jafari, (2008) با استفاده از مدل MPSIAC برابر ١٤/٩٨ تن در هکتار در سال می‌باشد (آمار مشاهده‌ای ١٦/۵۸ تن در هکتار در سال). بنابراین اختلاف بین مقدار رسوب مشاهده شده با مقدار برآورد شده توسط مدل RUSLE در این مطالعه برابر ۰/۲۱ تن در هکتار در سال است. به‌عبارت‌دیگر مقدار رسوب برآورد شده حدود ۱ در صد کمتر از مقدار رسوب اندازه گیری شده (مشاهده شده) (براساس محاسبه خطای نسبی) می‌باشد.

بنابراین اختلاف معنی‌داری بین نتایج این کار و آمار واقعی مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین ازآنجایی‌که مقدار بار رسوب برآوردی با استفاده از روش USDA (جدول ۷) تقریباً نزدیک به مقدار بار رسوب ثبت‌شده در ایستگاه رسوب‌سنجی حوضه چم‌گردلان ایلام (١٦/۵۸ تن در هکتار در سال) بود (Azami, 2001). ازاین‌رو، این روش به‌عنوان بهترین روش برای محاسبه نسبت تحویل رسوب انتخاب گردید و براساس آن، نقشه نسبت تحویل رسوب و بار رسوب تهیه شد (شکل‌های ١٢ و ١٣). در این روش، متوسط نسبت تحویل رسوب و رسوب سالانه از ۰/۰۵ تا ۰/٤٢ و ۰ تا ٥٤٦٨ تن در سال به ترتیب متغیر است.

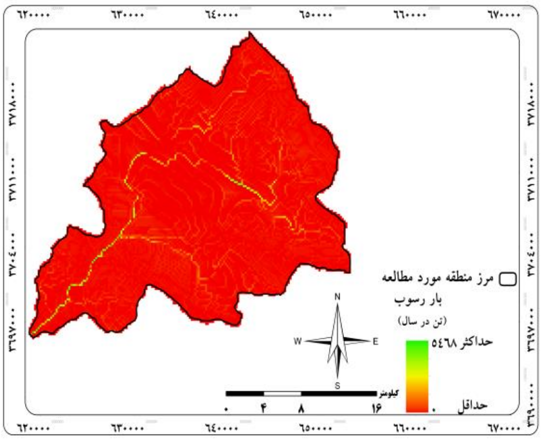
جدول ۷- روش‌های نسبت تحویل بار رسوب، مقادیر نسبت تحویل و بار رسوب در حوزه موردمطالعه

Table 7- Sediment load delivery ratio methods, delivery ratio values and sediment load in the study area

روش‌های تحویل بار رسوب	میزان نسبت تحویل	بار رسوب (تن در هکتار در سال)
وانونی	۰/۲۶	۱۱/۶۲
بویس	۰/۱۲	۵/۳۶
USDA	۰/۳۴	۱۶/۳۷



شکل ۱۲- نقشه نسبت تحویل رسوب



شکل ۱۳- نقشه بار رسوب

Fig.12. Sediment delivery ratio map

Fig.13. Sediment load map

محاسبه فرسایش و رسوب با مدل EPM

در حوضه موردنظر، برای تعیین میزان فرسایش خاک و همچنین تولید رسوب از مدل EPM استفاده گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات پایه و بازدیدهای میدانی انجام شده، ضرایب تعدادی از پارامترهای مدل برای منطقه موردمطالعه به شرح جدول ۸ می‌باشد. در این قسمت، میانگین چهار ضریب، موردبررسی و تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. نتایج چهار ضریب در فرسایش خاک در جدول ۸ مشخص شده است و سپس این چهار لایه (شکل ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷) در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.3 با هم همپوشانی شدند و نقشه شدت فرسایش منطقه به دست آمد؛ بنابراین و بر اساس رابطه ۱۳ و با همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی، نقشه شدت فرسایش حوضه (شکل ۱۸) تهیه گردید. لازم به ذکر است ضریب شدت فرسایش (Z) برای هر یک از واحدهای همگن به‌صورت جداگانه محاسبه گردید (جدول ۸) و میانگین آن برای کل حوضه در نظر گرفته شد. بر اساس اطلاعات به دست آمده از جدول ۸، ضریب استفاده از زمین حداقل ۰/۲۰

و حداکثر ۰/۶۰ می‌باشد و متوسط آن در مدل EPM، ۰/۴۰ برآورد شده است. متوسط ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) ۰/۷۱ می‌باشد که کمترین آن ۰/۵۰ و بیشترین آن ۱/۲۰ بر آورد شده است. ضریب فرسایش مشاهده‌ای یا حوضه منطقه که حداقل آن ۰/۲۰ و حداکثر آن ۰/۷۰ برآورد شده است. ضریب فرسایش (Z) در این منطقه به‌طور متوسط در کل حوضه برابر ۰/۸۹ می‌باشد که بر اساس جدول ۳ در محدوده فرسایش II یا شدید قرار دارد. جدول ۸، ضرایب فرسایش حوضه و ضریب شدت فرسایش را در واحدهای همگن به تفکیک مساحت نشان داده است. نتایج حاصل از بررسی نقشه شدت فرسایش نشان می‌دهد که بیشترین فرسایش در قسمت غرب و شرق حوضه قرار دارد. چون این منطقه از سازندهای ناپایدار و مستعد فرسایش تشکیل شده است. شیب زیاد منطقه به‌اضافه بارش باران و تغییر کاربری اراضی در این محدود بسیاری از عرصه‌های آن را با بحران فرسایش خاک مواجه کرده است. مقدار Z برای این مناطق بیش از ۱ است که نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری شدید این ناحیه می‌باشد(شکل ۱۸)

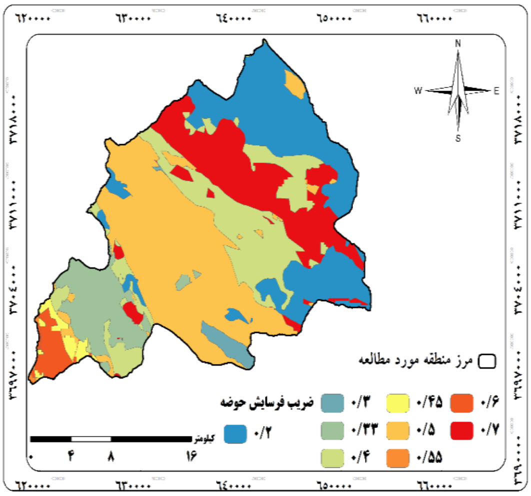
جدول ۸- داده‌های لازم جهت محاسبه شدت فرسایش خاک در واحدهای همگن با مدلEPM

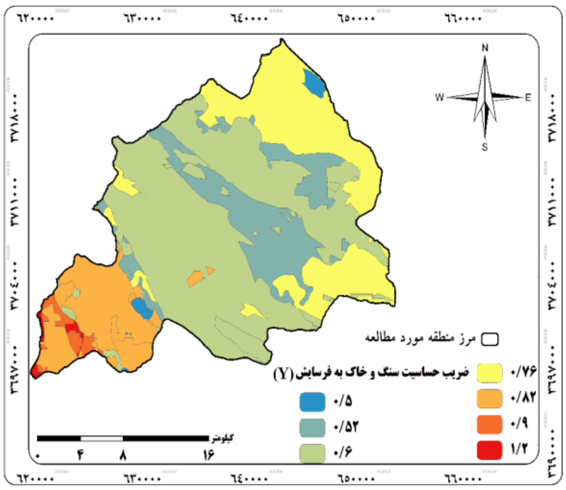
Table 8- Necessary data to calculate soil erosion intensity in homogeneous units with EPM model

شماره واحد همگن	ضریب استفاده از زمین	ضریب حساسیت سنگ و خاک	ضریب عامل فرسایش	شیب متوسط (در صد)	ضریب شیب	ضریب شدت فرسایش	کلاس فرسایش	مساحت (هکتار)
PN	Xa	y	Ψ	slope	$I^{0.5}$	Z	Erosion intensity	ha(area)
۱	۰/۶	۰/۵۲	۰/۴۰	۴	۲/۰۰	۰/۷۴	شدید	۸۸۱۲/۰۲
۲	۰/۳۵	۰/۶۰	۰/۷۰	۷	۲/۶۴	۰/۷۰	شدید	۹۵۸۰/۳۹
۳	۰/۳۰	۰/۶۰	۰/۵۰	۹	۳/۰۰	۰/۶۳	متوسط	۱۶۶۶۴/۶۷
۴	۰/۵۰	۰/۶۰	۰/۳۰	۷	۲/۶۴	۰/۸۸	شدید	۸۲۵/۸۲
۵	۰/۴۰	۱/۲	۰/۶۰	۱۰	۳/۱۶	۱/۸۰	خیلی شدید	۱۴۱/۶۵
۶	۰/۲۰	۰/۹۰	۰/۴۵	۷	۲/۶۴	۰/۵۵	متوسط	۸۹۵/۶۷
۷	۰/۲۰	۰/۸۲	۰/۴۰	۱۳	۳/۶۰	۰/۶۵	متوسط	۱۱۸۲/۵۸
۸	۰/۲۲	۰/۷۶	۰/۲۰	۲۲	۴/۶۹	۰/۸۱	شدید	۱۳۵۱۱/۴۹
۹	۰/۳۰	۰/۸۲	۰/۳۳	۳۲	۵/۶۵	۱/۴۷	خیلی شدید	۴۷۰۷/۲۴
۱۰	۰/۳۵	۰/۸۲	۰/۶۰	۱	۱/۰۰	۰/۴۵	متوسط	۱۲۷۷/۸۲
۱۱	۰/۳۰	۱/۲	۰/۵۰	۲	۱/۴۱	۰/۶۸	متوسط	۱۴۱/۰۷
۱۲	۰/۶۰	۱/۲	۰/۵۵	۲	۱/۴۱	۱/۴۱	خیلی شدید	۵۸/۱۶
۱۳	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۷۰	۲	۱/۴۱	۰/۶۳	متوسط	۲۳۹/۲۶

١٤	٠/٤٠	٠/٥٠	٠/٥٠	٢٠	٤/٤٧	٠/٩٩	شدید	٢٩١/٩١
١٥	٠/٣٠	١/٢٠	٠/٥٥	٥	٢/٢٣	١/٠٠	خیلی شدید	٤٠/٥٨
میانگین	٠/٣٧	٠/٨١	٠/٤٨	٩/٥٣	٢/٨٠	٠/٨٩		58370

همان‌طور که ذکر شد، نقشه‌های ضرایب شدت فرسایش در حوضه چم‌گردلان استان ایلام در شکل‌های ١٤، ١٥، ١٦ و ١٧ نشان داده شده است. همچنین در شکل ١٨ نقشه شدت فرسایش در حوضه چم‌گردلان نشان داده شده است که بر اساس آن کمترین مقدار فرسایش در قسمت‌های مرکزی و هموارتر منطقه است و بیشتر زیر کشت آبی و دیم و باغ‌کاری در مناطق با شیب کم قرار می‌گیرد که دارای فرسایش‌پذیری کمتری می‌باشد.

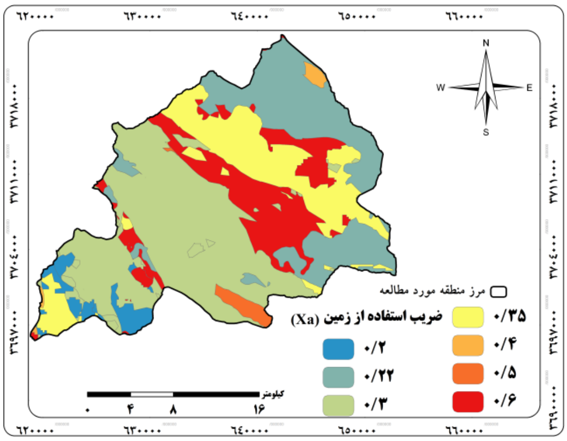


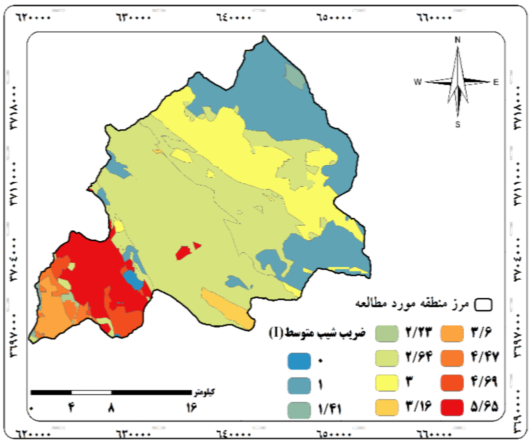


شکل ١٤- ضریب فرسایش حوضه(Ψ)   شکل ١٥- ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش(Y)

Fig.14. basin erosion coefficient (Ψ)

Fig.15. Coefficient of sensitivity of rock and soil to erosion (Y)



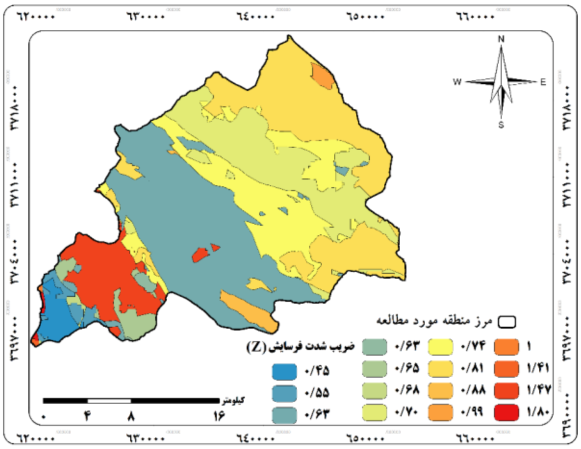


شکل ١٦- ضریب استفاده از زمین(Xa)

Fig.16. Land use coefficient (Xa)

١٧- ضریب شیب متوسط حوضه(I)

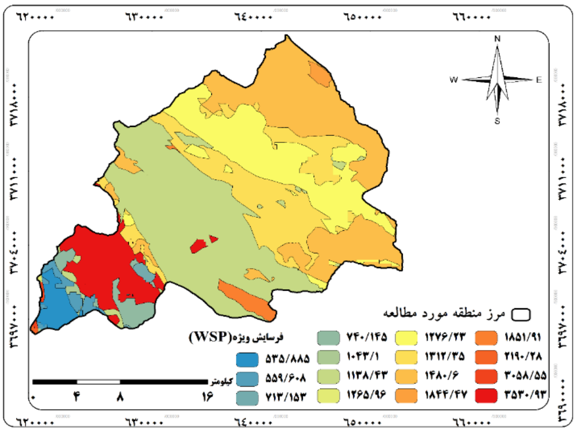
Fig.17. Average slope coefficient of the basin (I)

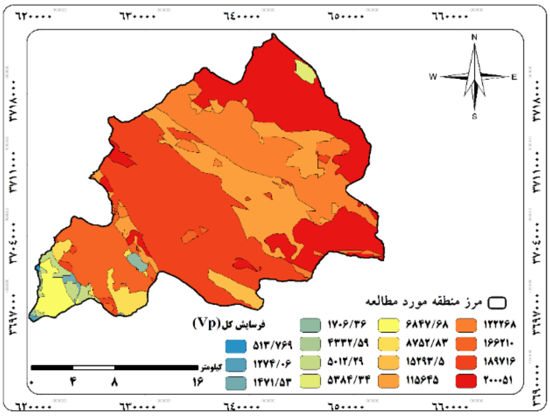


شکل ١٨- ضریب شدت فرسایش(Z)

Fig.18. Erosion intensity coefficient (Z)

طبق رابطه ١٤، لایه‌های دما، بارش و لایه‌های شدت فرسایش با توابع تحلیلی ذکر شده در عدد پی ضرب گردیده و با همپوشانی، نقشه سالانه فرسایش ویژه و فرسایش کل در حوضه به دست آمد(شکل‌های ١٩ و ٢٠).





شکل۱۹- فرسایش ویژه

Fig.19. Special erosion

شکل ۲۰- فرسایش کل

Fig.20. total erosion

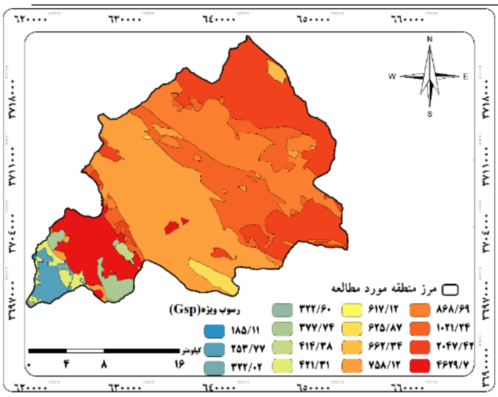
درنهایت از تلفیق نتایج به دست آمده، فرسایش ویژه، فرسایش کل، رسوب ویژه و رسوب کل در واحدهای همگن به دست آمد (جدول ۹). بر این اساس، میزان فرسایش ویژه و فرسایش کل به ترتیب معادل ۱۵۰۲ مترمکعب در کیلومترمربع در سال و ۸۷۷۱۷٤ مترمکعب در سال است. همچنین میزان رسوب ویژه و رسوب کل در حوضه آبخیز چم‌گردلان به ترتیب ۲۹۵٦ مترمکعب در کیلومترمربع در سال و ۱۱۹۱۰۰۲ مترمکعب در سال است. همچنین، در شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ به ترتیب نقشه‌های ضریب رسوب، رسوب ویژه و رسوب کل نشان داده شده است. با توجه به جدول شماره ۹، میزان فرسایش ویژه بسته به میزان ضریب شدت فرسایش در واحدهای همگن تغییر می‌کند. این تغییرپذیری، نتیجه کاربری‌های مختلف حوضه و همچنین سازندهای مختلف و شیب متغیر منطقه است.

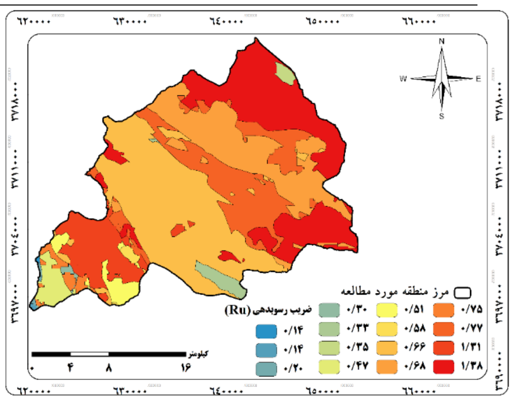
مقدار رسوب ویژه برای واحدهای همگن و کل حوضه بر حسب مترمکعب در کیلومترمربع در سال به دست آمد. سپس با در نظر گرفتن وزن مخصوص ظاهری خاک (۱/٤۳)، مقدار رسوب ویژه بر حسب تن در هکتار در سال محاسبه شد و مقدار آن ۲۱/٤۹ تن در هکتار در سال بر آورد گردید (جدول ۹). این در حالی است که مقدار رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب سنجی برابر ۱٦/٥۸ تن در هکتار در سال می‌باشد؛ به‌عبارت‌دیگر، مقایسه نتایج ایستگاه هیدرومتری و رسوب سنجی در خروجی حوضه با مدل EPM نشان‌دهنده هم‌خوانی ۷۱ درصدی رسوبی خروجی این مدل است. در جدول ۱۰، مقادیر مشاهده شده و برآورد شده در حوضه آبخیز چم‌گردان استان ایلام را مشاهده می‌فرمایید.

جدول ۹- فرسایش و رسوب محاسبه شده برای واحدهای همگن و کل حوضه با مدل EPM

Table 9- Erosion and sedimentation calculated for homogeneous units and the entire basin with the EPM model

شماره واحد همگن	فرسایش ویژه (مترمکعب در کیلومترمربع در سال)	مساحت (km^2)	فرسایش کل (مترمکعب در سال)	ضریب رسوبدهی در واحدهای همگن	Gsp ($m^3/year/km^2$)	Gs ($m^3/year$)
۱	۱۳۱۲/٤۰	۸۸/۱۲	۱۱٥٦٤٤/٦۰	۰/۷۸	۱٦۸٦/٤٥	۱٤۸٦۱۰/۱۰
۲	۱۲۷٦/۲۰	۹٥/۸۰	۱۲۲۲٦۸/۳۰	۰/٦۸	۱۸۷٤/۹۷	۱۷۹٦۲۹/٤۰
۳	۱۱۳۸/٤۰	۱٦٦/٦٤	۱۸۹۷۱٦/۳۰	۰/٦۷	۱۷۰۹/٥۳	۲۸٤۸۸٦/۹۰
٤	۱۸٥۱/۹۰	۸/۲٥	۱٥۲۹۳/٥٤	۰/۳٤	٥٤۷۹/٦۷5	٤٥۲٥۲/۳۰
٥	۳۰٥۸/٥۰	۱/٤۱	٤۳۳۲/٥۹	۰/۲۰	۱٥۱٥۸/٤٦	۲۱٤۷۲/۷۰
٦	٥٥۹/٦۰	۸/۹٥	٥۰۱۲/۲۸	۰/۷٥	۷٤۳/۳۰	٦٦٥۷/٥۰
۷	۷٤۰/۱۰	۱۱/۸۲	۸۷٥۲/۸۲	۰/٥۱	۱٤٥۰/۲٤	۱۷۱٥۰/۲۰
۸	۱٤۸۰/٦۰	۱۳٥/۱۱	۲۰۰۰٥۰/۹۰	۰/۸۱	۱۸۲۷/۹۰	۲٤٦۹۷٦/٤۰
۹	۳٥۳۰/۹۰	٤۷/۰۷	۱٦٦۲۰۹/٥۰	۰/۸۷	٤۰٥۸/٥٤	۱۹۱۰٤٥/٤۰
۱۰	٥۳٥/۹۰	۱۲/۷۷	٦۸٤۷/٦۸	۰/٤۷	۱۱۳۱/٦۱	۱٤٤٦۰/۰۰
۱۱	۱۰٤۳/۱۰	۱/٤۱	۱٤۷۱/٥۳	۰/۳۱	۳۳۷۸/۸۲	٤۷٦٦/٦۰
۱۲	۲۱۹۰/۳۰	۰/٥۸	۱۲۷٤/۰٥	۰/۱٥	۱٤۸۷۰/٥۰	۸٦٤۹/۹۰
۱۳	۷۱۳/۲۰	۲/۳۹	۱۷۰٦/۳٥	۰/٥۸	۱۲۲۷/۳۲	۲۹۳٦/٦۰
۱٤	۱۸٤٤/٥۰	۲/۹۱	٥۳۸٤/۳۳	۰/۳٦	٥۱۳٦/٤۲	۱٤۹۹٤/۱۰
۱٥	۱۲٦٦/۰۰	۰/٤۰	٥۱۳/۷٦	۰/۱٥	۸٦٥۷/۸۲	۳٥۱۳/٦۰
میانگین	۱٥۰۲/۷۷	٥۸۳/۷۰	۸۷۷۱۷٤/۹۰	۰/٥۱	۲۹٥٦/۷۸	۱۱۹۱۰۰۲



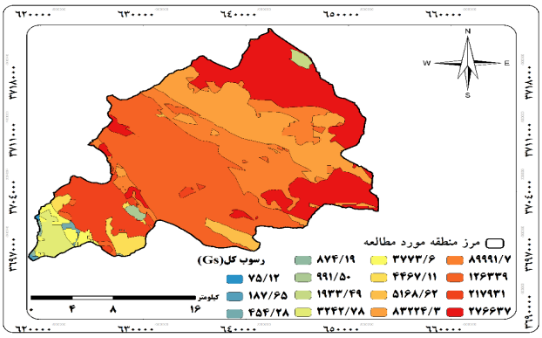


شکل ۲۱- ضریب رسوبدهی(RU)

Fig.21. Sedimentation coefficient (RU)

شکل ۲۲- رسوب ویژه

Fig.22. Special sediment



شکل ۲۳- رسوب کل

Fig.23. Total sediment

در جدول ۱۰، مقادیر مشاهده شده و برآورد شده در حوضه آبخیز چم‌گردان استان ایلام را مشاهده می‌فرمایید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان رسوب برآوردی مدل RUSLE، ١٦/٣٧ تن در هکتار در سال و در روش EPM، ٢١/٤٩ تن در هکتار در سال برآورد گردید که با توجه به نزدیک‌تر بودن مقدار برآوردی RUSLE به مقدار رسوب مشاهده‌ای ١٦/٥٨ تن در هکتار در سال، کارایی مدل RUSLE در برآورد رسوب منطقه موردمطالعه بیش‌تر است. درنهایت توصیه می‌شود، برای فازهای اولیه مطالعات توجیهی، اجمالی و شناسایی از مدل EPM و برای مطالعات تفصیلی و دقیق‌تر برآورد فرسایش و رسوب حوضه از روش RUSLE بهره گرفت.

جدول ۱۰- مقایسه مقادیر مشاهده شده و برآورد شده در حوضه آبخیز چمگردان استان ایلام

Table 10- Comparison of the observed and estimated values in Chamgardan aquifer basin of Ilam province

مقدار مشاهده شده (تن در هکتار درسال)	مقدار برآورد شده با مدل RUSLE (تن در هکتار درسال)	مقدار برآورد شده با مدل EPM (تن در هکتار درسال)
١٦/٥٨	١٦/٣٧	٢١/٤٩

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری مقدار فرسایش و رسوب به دلایل فنی، حفاظتی و اقتصادی در تمامی نقـاط امکـان‌پـذیر نیسـت. ازاین‌رو مناسب‌ترین راهکار، برآورد مقدار فرسایش و تولید رسوب با مدل‌های تجربـی اسـت کـه لازمـه آن آگاهی از مکانیسم‌های فرسایش و عوامل مؤثر بر آن است. از طرفی انتخاب مـدل مناسـب بـرای هـر منطقـه مستلزم ارزیابی دقت مدل‌های مختلف از طریق مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری آن‌ها به ضریب رسوبدهی واقعی در یک حوضه آبخیز می‌باشد. بر این اساس، در این تحقیق، میزان فرسایش و رسـوب حوضـه آبخیـز

چم‌گردلان ایلام با استفاده از دو مدل **EPM** و **RUSLE** موردبررسی قرار گرفت، از طرفی میزان رسوب مشاهده‌ای با استفاده از روش منحنی سنجه رسوب (حدواسط دسته‌ها) برآورد گردید و درنهایت مؤثرترین و کاراترین روش معرفی گردید.

در این مطالعه به‌منظور بررسی میزان فرسایش و برآورد مقدار رسوب در حوضه آبخیز چم‌گردلان استان ایلام، پس از امتیازدهی و تلفیق عوامل مؤثر به‌صورت لایه‌های رقومی در محیط نرم‌افزار **ArcGIS**، با استفاده از مدل‌های تجربی نقشه میزان فرسایش و رسوب حوضه موردنظر تعیین گردید.

نتایج برآورد معیارهای موردبررسی در روش **RUSLE** در حوضه آبخیز موردمطالعه نشان داد، فاکتور فرسایش‌پذیری از ۰/۲۸ تا ۰/٦٦ و معیار پوشش گیاهی از ۰/۳۵ تا ۰/٦٠ متغیر بوده که نشان‌دهنده تفاوت در ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی در مناطق مختلف حوضه است. نقشه فاکتور پوشش گیاهی نشان می‌دهد این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی حداکثر است و کمترین مقدار آن در مناطقی است که پوشش متراکم وجود دارد. نتایج حاصل از فاکتور فرسایندگی در حوضه چم‌گردلان نشان داد، میزان این فاکتور از ۱۳٦ در پایین‌دست تا ۳۹٦ مگاژول در میلی‌متر در سال در هکتار در بالادست حوضه در نوسان است و میزان فاکتور فرسایندگی باران در نقطه خروجی حوضه به حداقل می‌رسد. Miguel, Samuel-Rosa, Simao Dennis Dalmolin, Arajo Pedron, & Moura Bueno (2011)؛ Bahrawi et al.(2016) و Rezaee, Faridi, Ghorbani, & Kazemi (2018) معتقدند افزایش ارتفاع از سطح دریا سبب افزایش فاکتور فرسایندگی باران می‌گردد، چون که میزان بارش زیاد می‌شود. فرسایندگی باران در شمال‌شرقی و جنوب‌غربی حوضه موردمطالعه که ارتفاع بالاتری داشتند بیش‌تر بوده که با رنگ قرمز نشان داده شده است یا به‌عبارت‌دیگر، کاهش ارتفاع و باران رابطه مستقیمی با کاهش فاکتور **R** دارد. بررسی همبستگی آماری بین فاکتورهای **RUSLE** و مقدار فرسایش سالیانه خاک در منطقه موردمطالعه نیز نشان داد که فاکتور **LS** با ضریب همبستگی ۰/۸۱ بیشترین اهمیت را در برآورد فرسایش سالانه خاک در مدل **RUSLE** دارد.

در انجام محاسبات مربوط به مدل **EPM**، میانگین ضرایب فرسایش حوضه (**Ψ**)، استفاده از زمین (**Xa**)، حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (**Y**) و شیب متوسط (**I**) محاسبه و با مقایسه با جدول استاندارد، میزان فرسایش و کلاس فرسایش برای هرکدام از واحدهای همگن و درنهایت در کل حوضه برآورد گردید. چنانچه در جدول مربوطه مشاهده می‌فرمایید، ضریب شدت فرسایش (**Z**)، به‌جز ٦ واحد از ۱۵ واحد در کلاس شدت فرسایش شدید تا خیلی شدید قرارداشته و میانگین آن در کل حوضه ۰/۸۹ برآورد گردید. همچنین میزان فرسایش ویژه و رسوب ویژه کل حوضه به ترتیب ۱۵۰۲/۷۷ و ۲۹۵٦/۷۸ مترمکعب در کیلومترمربع در سال برآورد گردید. نتایج حاصل از کاربرد **EPM** در برآورد فرسایش نشان داد که میزان ٦۵ در صد از مساحت حوضه در کلاس فرسایشی شدید (زیاد) و خیلی شدید (زیاد) دارد (شرقی و میانی

حوضه) و حدود ۳۵ درصد حوضه در کلاس فرسایش کم تا متوسط است. با استفاده از روش فوق، مقدار رسوب سالانه ۲۱/٤۹ تن در هکتار در سال برآورد گردید.

بر اساس نتایج حاصل از روش **RUSLE** بیشترین وسعت حوضه مربوط به کلاس فرسایشی خیلی‌کم، کم و متوسط است که عموماً در کل حوضه پراکنش دارد و کمترین مساحت حوضه در کلاس فرسایشی زیاد تا خیلی زیاد (۲۰ درصد) قرار می‌گیرد و بر این اساس مقدار رسوب سالانه در این روش ۱٦/۳۷ تن در هکتار در سال برآورد گردید. بنابراین، نتایج حاصل از **EPM**، غالب فرسایش را در کلاس شدید تا خیلی شدید و مدل **RUSLE** در کلاس خیلی‌کم تا متوسط برآورد نموده‌اند، بدین معنی که مدل **EPM** دچار پیش‌برآورد و مدل **RUSLE** دچار کم‌برآورده شده است. نتایج حاصل از بررسی نقشه فرسایش در هر دو مدل نشان می‌دهد که بیشترین فرسایش در قسمت غرب و میانه حوضه قرار دارد. چون این منطقه از سازندهای ناپایدار و مستعد فرسایش تشکیل شده است. شیب زیاد منطقه به اضافه بارش باران و تغییر کاربری اراضی در این محدود بسیاری از عرصه‌های آن را با بحران فرسایش خاک مواجه کرده است. مقدار **Z** برای این مناطق بیش از ۱ است که نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری شدید این منطقه می‌باشد.

یکی از عوامل مؤثر بر فرسایش و تولید رسوب، رژیم بارندگی و اقلیم حوضه است که با بررسی آن مشخص شد که قسمت عمده ریزش‌های جوی در حوضه آبخیز چم‌گردلان از نوع باران است و در فصل زمستان با برف همراه می‌شود ولیکن بارندگی به‌خصوص با شدت‌های بالا و زمان کم، باعث جریان سریع و شدت رواناب شده که با خود مقدار زیادی از خاک سطحی را تخریب و به‌صورت رسوب و بار معلق به مناطق پایین‌دست و خروجی حوضه حمل می‌کند.

از دیگر عوامل مؤثر بر فرسایش و تولید رسوب و ایجاد سیلاب حوضه، خصوصیات فیزیوگرافی و توپوگرافی ازجمله شیب و ارتفاع است. شیب حوضه آبخیز چم‌گردلان در اکثر قسمت‌های آن چشمگیر است به‌طوری‌که در بیشتر قسمت‌های این حوضه شیب بیشتر از ۲۰ درصد است که در سرعت بخشیدن به فرسایش و پارامترهای مؤثر در آن ازجمله رواناب تأثیرگذار است. به‌طورکلی در حوضه‌های با شیب ملایم به دلیل اینکه قدرت آب جاری کاهش پیدا می‌کند، بنابراین اشکال مختلف فرسایش نیز کمتر دیده می‌شود؛ درحالی‌که در حوضه آبخیز چم‌گردلان به دلیل کوهستانی بودن قسمت‌های زیادی از آن، عکس این حالت اتفاق می‌افتد.

پوشش گیاهی و کاربری اراضی یکی دیگر از عوامل مؤثر در فرسایش و رسوب حوضه به شمار می‌رود. طبیعی است مناطقی که دارای پوشش گیاهی جنگلی و مرتعی مناسب باشد، کمتر در معرض تخریب و فرسایش قرار می‌گیرند. در حوضه آبخیز چم‌گردلان که حدود ۷۰ درصد از مساحت حوضه را جنگل و مرتع با تراکم‌های مختلف پوشانده است، انتظار می‌رود، وضعیت کنترل فرسایش در سطح حوضه آبخیز مناسب و

میزان ضریب فرسایش در حد کم باشد؛ لیکن به دلایل مختلف ازجمله چرای مفرط و دائم مرتع توسط دام-های منطقه، عدم رعایت تعادل دام و مرتع توسط دامداران، اعمال روش‌های غلط شخم اراضی، قطع بی‌رویه درختان، درختچه‌ها و بوته‌ها، عدم رعایت اصول بهره‌برداری صحیح از اراضی، تبدیل جنگل‌ها و مراتع به اراضی کشاورزی، خاک و زمین‌شناسی و تأثیر عوامل اقلیمی به‌خصوص پراکنش و شدت بارندگی، باعث شده است که وضعیت فرسایش حوضه آبخیز در حد شدید و بسیار شدید قرار گیرد. لذا اعمال روش‌های مختلف کنترل فرسایش در سطح حوضه ضروری است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد میزان رسوب برآوردی در روش **RUSLE**، ۱۶/۳۷ تن در هکتار در سال و در روش **EPM**، ۲۱/۴۹ تن در هکتار در سال برآورد گردید که با توجه به نزدیک‌تر بودن مقدار برآوردی **RUSLE** به مقدار مشاهده‌ای ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال، کارایی مدل **RUSLE** در برآورد رسوب منطقه موردمطالعه بیشتر است. محققینی چون Bahrawi et al.(2016)؛ Miguel et al., (2011)؛ Vaezi, Bahrami, Sadeghi, & Mahdian (2010)؛ Rezaee, Faridi, Ghorbani, & Kazemi, (2018) و Teimourri & Bazrafshan (2018) کارایی بالای مدل **RUSLE** را تأیید می‌نمایند. Rafahi & Nemeti (1995)؛ Abedini, Shabrang, & Esmaeli (2014)؛ Khodabakhsh, Mohammadi, Rafie, & Bozorg Zadeh, (2010) و Sadog, Hoseinzadeh, & Azadi (2015) کارایی نامناسب مدل **EPM** را در برآورد فرسایش و رسوب در مطالعات تفصیلی تائید نموده‌اند.

References

Abedini, M., Shabrang, S., & Esmaeli, A. (2014). Review on Soil Erosion and Sedimentation in Meshkin Chai Catchment Area by EPM Method. *Geography and Development*, *11*(30), 87-100. [In Persian] https://doi.org/10.22111/gdij.2014.245

Amiri, F., Arzani, H., Farahpour, M., Chaeichi, M.R., & Khajeh Aldin, S.J.A.D. (2009). Efficiency of Mpsiac and EPM Models for Assessment Soil Erosion in Range Suitability. Rangeland, 3(1), 138-154. [In Persian] https://sid.ir/paper/136360/en

Ansari Lari, A., & Ansari, M. (2017). Evaluation of soil erosion risk and sedimentation potential by using EPM model in Gabric basin- SE Hormozgan- Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, *6*(11), 1-14. [In Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2017.2965

Asgari, S.A., Servati, M.R., & Jafari, M.R. (2008). Estimating the Oil Erosion and Production of Sediment in the Basin of the Ilam Dam by using MPSIAC Model. *Physical Geography Research*, 40(64), 29-35. [In Persian] https://www.sid.ir/paper/5427/en

Azami, A. (2001). Comparison of Various Methods for Estimating Sediment Yield in Ilam Dam Watershed. (published M.sc. thesis). Gorgan University. (in persian).

Azimi Sardari, M.R., Bazrafshan, O.A., Panagupulus, T., & Rafiei Sardoei, E. (2019). Current and Future Assessment of Soil Erosion in the Catchment Area of Esteghlal Dam in

Minab Using RUSLE-3D Model and Climate Change Scenarios. *Desert Management*, 7 (14), 132-119. [In Persian]. https://doi.org/10.22034/jdmal.2020.38480.

Bahrawi, A.J., Elhag, M., Aldhebiani, A.Y., Galal, H.K., Hegazy, A.K., & Alghailani, E. (2016). Soil Erosion Estimation Using Remote Sensing Techniques in Wadi Yalamlam Basin, Saudi Arabia. *Advances in Materials Science and Engineering*. https://doi.org/10.1155/2016/9585962.

Bartsch, K.P., Van Miegroet, H., Boettinger, J., & Dobrwolski, J.P. (2002). Using Empirical Erosion Models and GIS to Determine Erosion Risk at Camp Williams. *Journal of Soil and Water Conservation,* 57(1), 29-37. https://www.jswconline.org/content/57/1/29/tab-references.

Benkobi, L., Trlica, M.J., & Smith, J.L. (1994). Evaluation of a Refined Surface Cover Subfactor for Use in RUSLE. Journal of Range Manage 47(1),74–78. https://doi.org/10.2307/4002845

Biesemans, J., Meirvenne, M.V., & Gabriels, D. (2000). Extending the RUSLE with the Monte Carlo Error Propagation Technique to Predict Long-Term Average Off-Site Sediment Accumulation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(1), 35–42. https://www.jswconline.org/content/55/1/35

Bagio, á., Bertol, I., Wolschick, N.H., Schneiders, D., & Aparecida, M. (2017). Water Erosion in Different Slope Lengths on Bare Soil. Revista Brasileira de Ciência do Solo. DOI: 10.1590/18069657rbcs20160132

Boggs, G., Devonport, C., Evans, K., & Puig, P. (2001). GIS-Based Rapid Assessment of Erosion Risk in a Small Catchment in the Wet/Dry Tropics of Australia. *Land Degradation and Development*, 12(5), 417–434. https://doi.org/10.1002/ldr.457

Boyce, R. C. (1975). Sediment Routing with Sediment Delivery Ratios. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources,* US Dept. Agric. Publ. ARS-S-40, 61-65.

Deore, S.J. (2006). *Prioritization of Micro-watersheds of Upper Bhama Basin on the Basis of Soil Erosion Risk Using Remote Sensing and GIS Technology*. (published doctoral. dissertation). University of Pune, Department of Geography.

Elirehema, Y. (2001). Soil Water Erosion Modeling in Selected Watersheds in Southern Spain. IFA, ITC, Enschede. https://doi.org/10.1002/ldr.457

Ferro, V., Giordano, G., & Lovino, M. (1991). Isoerosivity and Erosion Risk Map for Sicily. *Hydrological Science Journal*, 36(6),549–564. https://doi.org/10.1080/02626669109492543.

Gavrilovic, Z. (1988, May). The Use of an Empirical Method (Erosion Potential Method) for Calculating Sediment Production and Transportation in Unstudied or Torrential streams. Paper presented at the International Conference of River Regime, Wallingford. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1840329.

Haan, C.T., Barfield, B.J., & Hayes, J.C. (1994). *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments. San Diego*, Academic Press. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1687737

Khodabakhsh, S., Mohammadi, A., Rafie, B., & Bozorg Zadeh, I. (2010). Comparison of erosion and sediment yield estimation in Sezar sub-basin (Dez drainage basin) by MPSIAC and EPM empirical methods, using GIS. *Iranian Journal of Geology*, 3(12), 51-61. [In Persian**]** https://www.magiran.com/p886221

Lal, R. (1990). Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management. New York, McGraw-Hill. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2193850

Lin, C.Y. (1997). A Study on the Width and Placement of Vegetated Buffer Strips in a Mudstone-Distributed Watershed. *Journal of China. Soil Water Conserve*, 29 (3), 250-266 [In Chinese with English abstract].
McCool, D.K., Brown, L.C., & Foster, G.R. (1987). Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 30, 1387–1396. https://doi.org/10.13031/2013.30576.
Miguel, P.A., Samuel-Rosa, R., Simao Dennis Dalmolin, F., Arajo Pedron, J., & Moura Bueno, A. (2011). The USLE Model for Estimating Soil Erosion in Complex Topography Areas. Annals XV Brazilian Symposium on Remote Sensing, (SBSR), Brasil, 85, 9227-9230.
Milevski, I. (2008, July). Estimation of Soil Erosion Risk in the Upper Part of Bregalnica Watershed-Republic of Macedonia, Based on Digital Elevation Model and Satellite Imagery. Paper presented at the 5th International Conference on Geographic Information Systems (ICGIS-)(Turkey), Istanbul,(pp.351-358). https://www.researchgate.net/publication/265012436
Mokhtari, L.G., Shafiei, N,. & Rahmani, A. (2019). Estimation of Soil Erosion Using RUSLE Model, A Case Study of Noorabad Mamasani Basin. *Hydrogeomorphology*, 5(17), 1-21. [In Persian). https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_8601_en.html?lang=en
Moore, I.D., & Wilson, J.P. (1993). Length-Slope Factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified Method of Estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47(4),423–428. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=674926.
Moradi, M., Ghonchepour, D., Nohegar, A., & Mahmoudi Nejad, V. (2012). A Comparison of the MPSIAC and EPM Models for Estimating Erosion and Sediment in the Poorahmadi Catchment. Environmental Erosion Researches, 1(4), 54-68. [In Persian] https://www.sid.ir/paper/223084/en
Morgan, R.P.C. (1995). Soil Erosion and Conservation. London, Longman. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=117218
Noori, H., Siadatmousavi, S. M., & Mojaradi, B. (2017). Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield Based on Satellite Imagery Using the GIS Technique and Employing Erosion Potential Method (EPM) on Watersheds (Case study: the Dez Watershed). *Water Resources Engineering*, *10*(32), 45-54. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1396.10.32.6.2
Nouwakpo, S.K., Williams, C.J., Al-Hamdan, O.Z., Weltz, M.A., Pierson, F. & Nearing, M. (2016). A Review of Concentrated Flow Erosion Processes on Rangelands: Fundamental Understanding and Knowledge Gaps. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 75-86. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.05.003
Rafahi, H., & Nemeti, M. (1995). Application of EPM Method in Studying Rate of Erodibility and Sedimentation in Alamut-Rud Watershed. *Iranian Journal of Agricultur Science,* 26(1), 33-46. [In Persian] https://journal.ut.ac.ir/article_16105_601401dd19a510faf4563182d15e1ac5.pdf
Renard, K.G., & Freimund, J.R. (1994). Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R Factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 287–306. https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4.
Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., & Yoder, D.C. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook, 703, USDA-ARS. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/ruslech2.pdf
Rezaee, P., Faridi, P., Ghorbani, M., & Kazemi, M. (2018). Estimation of Soil Erosion Using the RUSLE Model and Identification of its Most Effective Factor in the Gabrik

Watershed-South-Eastern Hormozgan Province *Quantitative Geomorphological Research*, *3*(1), 97-113. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1393.3.1.7.3

Sadog, H., Hoseinzadeh, M.M., & Azadi, F. (2015). Determining the Erosion in Kahman Drainage Basin Using EPM, BLM and Fargas Models. *Hydrogeomorphology*, *2*(2), 137-154. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.2.8.7

Shahbazi, K. (1999). Estimation of Erosion and Sediment by Qualitative Geomorphology (Homogenous Units) and EPM Methods and Comparing them with Outlet Sediment Data in Ilam Dam Basin. (published MS.c thesis). Tarbiat Modarres University, School of Natural Resources. [In Persian].

Tazioli, A. (2009). Evaluation of Erosion in Equipped Basins: Preliminary Results of a Comparison Between the Gavrilovic Model and Direct Measurements of Sediment Transport. *Environmental Geology*, 56(5), 825-831. https://doi.org/10.1007/s00254-007-1183-y

Teimourri, F., & Bazrafshan, O. (2018). Comparison of the Efficiency the RUSLE and EPM Models in Estimating Soil Erosion and Sediment Yield According to the Sediment Rating curve (case study :Jask-Gabrik watershed). *New Findings in Applied Geology*,12(23), 50-62. [In Persian] https://journals.basu.ac.ir/article_2278_101b5eaf999bfabc46cbcf8240155c1e.pdf

USDA. (1975). Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios. National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation. https://irrigationtoolbox.com/NEH/Part632_SedimentationGeology/NEH3_06.PDF

Vaezi, A.R., Abasi, M., & Abd Haji Maleki, K.H. (2017). Evaluation of RUSLE Model Combined with Remote Sensing and GIS in Small Drainage Areas in the Semi-Arid Region, Northwestern Iran. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11 (38), 1-10. [In Persian]. https://www.sid.ir/paper/134808/en#downloadbottom.

Vaezi, A.R., Bahrami, H.A., Sadeghi, S.H.R., & Mahdian, M.H. (2010). Spatial Variability of Soil Erodibility Factor (K) of the USLE in North West of Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12, 241-252. [In Persian]. http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2010.12.2.11.9

Vanoni, V.A. (1975). Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y. https://webstore.ansi.org/preview-pages/ASCE/preview_9780784471340.pdf.

Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion. Losses: A Guide to Conservation Planning. *Agriculture Handbook*, 537. US Department of Agriculture, Washington, DC,. https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/RUSLE/AH_537%20Predicting%20Rainfall%20Soil%20Losses.pdf

Yu, B., & Rosewell, C.J. (1996). A Robust Estimator of the R Factor for the Universal Soil Loss Equation. American Society of Agricultural Engineers, 39(2), 559–561. https://typeset.io/pdf/a-robust-estimators-of-the-r-reaction-for-the-universal-soil-7rxy1i22im.pdf

Yue-Qing, X., Shao, X-M., & Kong, X-B. (2008). Adapting the RUSLE and GIS to Model Soil Erosion Risk in a Mountain Karst Watershed, Guizhou Province, China, *Environment Monitoring and Assessment*, 141, 275-286. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9894-9.